

O CÉU QUE NOS ENVOLVE

INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA PARA EDUCADORES E INICIANTES

EDIÇÃO E COORDENAÇÃO: ENOS PICAZZIO



O CÉU QUE NOS ENVOLVE

Introdução à astronomia para educadores e iniciantes



Todos os direitos desta edição reservados à:

Produção gráfica: Odysseus Editora

Revisão final: Pedro Ulsen

Projeto gráfico, capa e diagramação: Vania Vieira

Odysseus Editora Ltda.

R. dos Macunis, 495 – CEP 05444-001 – Tel./fax: (11) 3816-0835

editora@odysseus.com.br – www.odysseus.com.br

ISBN: 978-85-7876-021-2

Edição: 1ª

Ano: 2011

Edição e Coordenação: Enos Picazzio

Autores: Augusto Damineli

Eder Cassola Molina

Enos Picazzio

Gastão B. Lima Neto

Jane Gregorio-Hetem

Roberto Costa

Ulisses Capozzoli

Vera Jatenco

Walter Maciel

Revisão técnica: Ulisses Capozzoli

Financiamento: CNPq



APRESENTAÇÃO

O céu intriga o homem desde a pré-história, representado em pinturas anteriores à escrita e em mitos sobre deuses e heróis. Não tardou até que começássemos a tentar entendê-lo.

A astronomia nasceu de observações ainda a olho nu e de hipóteses que nem sempre se mostraram verdadeiras. Da Mesopotâmia à América, os primeiros estudos do céu tiveram impacto em diversos aspectos de cada cultura, desde a religião até a divisão e a organização do tempo.

Ainda hoje, a astronomia continua a nos desafiar. Agora com técnicas e equipamentos mais precisos e sensíveis, podemos descobrir cada vez mais sobre o funcionamento da máquina do Universo – mas sempre encontrando novas perguntas que mantêm nossos olhares voltados para o alto.

O céu que nos envolve apresenta a astronomia de acordo com o conhecimento presente e de forma bastante acessível. Assim, este livro busca responder algumas perguntas de quem já se encantou pelo céu e despertar o interesse dos que ainda não mergulharam em seus mistérios.

Os capítulos, escritos por astrônomos com vasta experiência em pesquisa, ensino e divulgação, estão organizados para atender a interesses específicos, aprofundando cada tema de forma particularizada.

No entanto, este livro também pode ser lido como uma jornada. Partimos do modo como nos relacionamos com a astronomia – desde o que ela representou e o que representa ao homem até os modos como observamos e estudamos o céu. Caminhamos por suas implicações para nosso planeta e para o Sistema Solar, com a combinação de fúria e harmonia essencial para sua formação e seu funcionamento. Viajamos em direção às estrelas e às galáxias, até lançarmos nosso olhar ao Universo – sua história, sua composição e a Teoria do Big Bang, com seu embasamento teórico e observacional. E encerramos o percurso voltando a uma questão essencial: a vida, e como ela poderia se manifestar no Universo.

Com finalidade educativa, *O céu que nos envolve* é complementado por um Manual do Educador que inclui informações e sugestões para seu uso em ambiente escolar. O objetivo desse material é levar um pouco do Universo aos estudantes brasileiros, integrando um trabalho que vem sendo realizado no Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP há algumas décadas.

Nossa produção voltada a atividades de educação e divulgação inclui livros, apostilas, artigos em revistas e painéis. Dois livros elaborados por pesquisadores do Departamento de Astronomia foram agraciados com o prêmio Jabuti: em 2000, *Introdução à estrutura e evolução estelar* (W. J.

Maciel); e em 2001, *Astronomia. Uma visão geral* (orgs. A. C. S. Friaça, E. Dal Pino, L. Sodré Jr., V. Jatenco-Pereira).

Também são realizados palestras e atendimentos monitorados para estudantes e para o público em geral, além de cursos de extensão universitária para professores de Ensino Fundamental e Médio, para profissionais com formação em ciências exatas, e para apaixonados por astronomia da Terceira Idade. Todas essas iniciativas contam com a participação de professores, de pós-doutorandos, pós-graduandos e alunos de graduação do Departamento de Astronomia.

Não podemos deixar de registrar que este livro tampouco teria sido realizado sem a colaboração de pessoas diversas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para sua existência e seu aperfeiçoamento. O apoio financeiro do CNPq foi fundamental para sua conclusão, assim como o apoio do Departamento de Astronomia e do próprio IAG-USP.

A todos que de alguma forma contribuíram, deixamos nossos agradecimentos.

OS AUTORES

Augusto Damineli - Capítulo 11

Professor titular do Departamento de Astronomia do IAGUSP. Autor/co-autor em 51 artigos em revistas científicas internacionais que receberam mais de 1600 citações. É autor/co-autor de 4 livros. Foi diretor dos Telescópios Gemini e presidente da Sociedade Astronômica Brasileira. Coordenou o Ano Internacional da Astronomia 2009 no Brasil. Publicou mais de 150 artigos em jornais e revistas. Participou em 6 roteiros de vídeos científicos na série Minuto Científico da TV Cultura, ganhadora de 3 prêmios internacionais.

Eder Cassola Molina - Capítulo 4

Formado em Engenharia Química (FEI, 1985) e Bacharelado em Geofísica (IAG-USP, 1987). Mestrado, doutorado e livre-docência em Geofísica, todos pela Universidade de São Paulo. Trabalha no IAG-USP desde 1988 nas áreas do estudo do campo de gravidade e do campo magnético terrestre voltados à investigação da estrutura da Terra e à exploração de minerais e hidrocarbonetos. Foi coordenador adjunto da área de Ciências do PNLD 2004, é autor de artigos e capítulos em livros e revistas de divulgação científica.

Enos Picazzio - Capítulo 3, 4 e 5

Bacharelado e Licenciatura em Física pela Universidade Mackenzie (1972), Mestrado (1977) e Doutorado (1991) em Astronomia pelo IAGUSP, Pós-doutorado pelo Observatório de Paris-Meudon (1994). Especialista em Astrofísica do Sistema Solar. Autor de artigos científicos em revistas especializadas, de capítulos em livros e de artigos de divulgação científica. Presidente da Comissão de Cultura e Extensão do IAGUSP. Coordenador de Módulo do Curso de Licenciatura em Ciências por EaD da USP-Univesp.

Gastão B. Lima Neto - Capítulo 9 e 10

Professor Associado do Departamento de Astronomia do IAG/USP e sua pesquisa é voltada a astrofísica extragaláctica. Graduado pelo Instituto de Física/USP, Mestre pelo IAG/USP, defendeu sua tese de doutorado em 1993 na Universidade de Paris VII, França. Entre 1994 a 1998, fez pós-doutorado em Berlin, Lyon e Paris. Atualmente é coordenador de um projeto de cooperação franco-brasileiro cujo foco é a análise e a interpretação de observações em raios X de aglomerados e grupos de galáxias.

Jane Gregorio-Hetem - Capítulo 7

Bacharel em Física pelo Instituto de Física da USP (1982), com mestrado (1986) e doutorado (1991) em Astronomia pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP). Realizou pós-doutoramento no Centre d'Études de Saclay/Service d'Astrophysique (1993-1995, França). Professor Associado pelo IAG/USP em 2003.

Membro da diretoria da Sociedade Astronômica Brasileira (secretária-geral, 1999-2001; vice-presidente, 2001-2003). Representante brasileira na Comissão de Ensino da União Astronômica Internacional (desde 1999). Especialidade: astrofísica estelar - estrelas jovens.

Roberto D. Dias da Costa - Capítulo 2

Possui graduação em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS (1982), Mestrado em Física pela UFRGS (1986), Doutorado em Ciências (Astronomia) pela Universidade de São Paulo - USP (1993) e Livre-Docência em Astronomia pela USP (2002). É Professor Associado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Trabalha na área de Evolução Estelar, atuando principalmente nos seguintes temas: nebulosas planetárias, abundâncias químicas nebulares e evolução química da Galáxia e de outros sistemas estelares.

Ulisses Capozzoli - Capítulo 1

Jornalista especializado em divulgação de ciência é mestre e doutor em ciências pela Universidade de São Paulo. Editor de Scientific American Brasil, é autor de livros como Antártida, a última terra (Edusp) e No reino dos astrônomos cegos – uma história da radioastronomia (Record)

Vera Jatenco-Pereira - Capítulo 6

Bacharel e licenciada em Física (1979, PUC-SP), mestre e doutora (1982 e 1989, respectivamente) pelo IAG-USP. De 1987 a 1989, foi pesquisadora visitante no Institute for Fusion Studies (The University of Texas at Austin, USA). Docente do Departamento de Astronomia desde 1986, atualmente como professora associada, desenvolve pesquisas e orienta estudantes nas áreas de astrofísica estelar e do meio interestelar.

Walter Junqueira Maciel - Capítulo 8

Nasceu em Cruzília, MG. Graduiu-se em Física pela UFMG, obteve o mestrado no ITA, e o doutorado na USP. Fez estágios em Groningen, Holanda, e Heidelberg, Alemanha. É professor titular no Departamento de Astronomia do IAG/USP, onde trabalha desde 1974. Publicou cerca de 150 artigos de pesquisa em publicações internacionais e 60 artigos em publicações nacionais. É autor dos livros “Introdução à Estrutura e Evolução Estelar” prêmio Jabuti em 2000, “Astrofísica do Meio Interestelar” e “Hidrodinâmica e Ventos estelares: uma introdução”, todos pela Edusp. É um dos autores do livro “Astronomia, uma Visão Geral do Universo”, prêmio Jabuti em 2001.

ÍNDICE

Cap. 1 - Uma pré-história do céu	12
Cap. 2 - Instrumentos e técnicas astronômicas	27
Cap. 3 - Movimento aparente do céu	55
Cap. 4 - A Terra	79
Cap. 5 - Sistemas planetários	99
Cap. 6 - Sol	153
Cap. 7 - Estrelas	176
Cap. 8 - A Via Láctea	200
Cap. 9 - Galáxias	229
Cap. 10 - Cosmologia	256
Cap. 11 - À procura de vida fora da Terra	277

CAPÍTULO 1

Uma pré-história do céu

Ulisses Capozzoli

- 1.1 INTRODUÇÃO
- 1.2 A ESCULTURA DA HISTÓRIA
- 1.3 ANTECIPAÇÃO DO FUTURO
- 1.4 GEOMETRIA NA GRÉCIA
- 1.5 A SÍNTESE DE HIPARCO
- 1.6 O CÉU DO NOVO MUNDO
- 1.7 INVASÕES BÁRBARAS

Cada uma das culturas humanas concebeu seus próprios conceitos do céu. Para compreender o funcionamento da máquina do Universo, como fizeram os gregos, ou antecipar o futuro do tempo.

Ulisses Capozzoli

1.1 INTRODUÇÃO

De alguma maneira, tudo começou com o primeiro homem, ainda que ele não passe de pura alegoria. Do primeiro homem, arqueólogos, paleontólogos, e todos os que escavam em busca de formas antigas de cultura e vida, jamais encontrarão restos de um molar, pedaços de uma costela partida, uma falange, ou uma vértebra roída pelo tempo. E a razão do fracasso nessa busca se justifica por essa criatura não ser real, ainda que esteja presente na aurora da humanidade. O primeiro homem é um estágio no processo de tecer os fios da vida. E, de maneira surpreendente, o primeiro homem está ligado ao último deles.

Essa conexão expressa a força da vida e por ela transita, como numa fita de celuloide, tudo o que o homem foi, é e será. E tudo é apenas um fluxo de tempo.

O homem é parte indissociável do Universo. O material que emergiu do Big Bang, associado ao que posteriormente fundiu-se nos caldeirões estelares, constrói suas entranhas, músculos, pulmão e coração. E como o Universo inteiro, o homem transmuta sem cessar. Ele já foi uma criatura vestida com pele grosseira, rosnando com o som de uma fera determinada a capturar sua presa, segundo os relatos de Charles Darwin que surpreendem ainda hoje.

Os livros que registram a história da ciência – a aventura da busca do conhecimento que faz do homem uma criatura humana – costumam iniciar seus relatos a partir de terrenos minimamente consistentes. Ainda que possam ser, como ocorre na astronomia, paisagens da Caldeia, onde pastores dedicando os ouvidos ao balido das ovelhas, consagraram os olhos à vastidão da noite estrelada.

Da aurora da humanidade à era dos pastores – quando muitos animais estavam domesticados e a agricultura já tinha raízes profundas – há um longo espaço de tempo. Entre um e outro desses estágios, grupos humanos vagaram, por diferentes regiões da Terra em busca de alimentação e temperaturas amenas ao longo das estações do ano, resultado da ligeira inclinação do eixo de rotação do planeta.

Esse deslocamento que nunca cessou permite concluir que desde o início o destino do homem esteve ligado ao céu. E isso continua ainda hoje com a criação recente da cosmologia, a busca de padrões para se definir a velocidade com que galáxias se afastam umas das outras, a investigação do coração de fogo das estrelas, a natureza fugidia da matéria e energia escuras. O mapeamento das entranhas de buracos negros e a pergunta incessante sobre eventualmente sermos a única inteligência no Universo.

No passado remoto, entre grupos que vagaram desde sempre, houve como ainda há, indivíduos com

habilidades especiais. Alguns mais hábeis na caça. Outros com talentos para curar, utilizando ervas e recursos que estão nas raízes do xamanismo e na medicina moderna. Outros ainda podem ter desenvolvido acuidade para observar o céu e prever a chegada das estações, a base do calendário, associado à agricultura.

Um deles gravou, no interior da gruta de Lascaux, na França atual, sinais datados em 17 mil anos que arqueoastrônomos julgam representar o asterismo das Plêiades. Embora Lascaux abrigue algumas das pinturas rupestres mais antigas, esses registros são recentes, em comparação à idade do homem.

O homem já havia feito conquistas formidáveis, quando um grupo deles ornamentou o interior de Lascaux não só com motivos astronômicos, mas com magníficas cenas de caça. Há 40 mil anos, homens ainda mais antigos já haviam adornado os amplos salões de Altamira, numa região que hoje é parte da Espanha. Eles legaram o que antropólogos, arqueólogos e artistas reconhecem hoje como a Capela Sistina da pré-história. E cinco mil anos depois dos grafismos de Lascaux, no Crescente Fértil, região que avança do Mediterrâneo à Mesopotâmia, foi fundada a agricultura.

Diferentes grupos, ao longo desse período de tempo, podem ter sido surpreendidos por chuvas de meteoros, como os Leonídeos que ainda hoje iluminam o céu como fósforos riscados contra a parede escura da noite. Que perguntas foram feitas pelo grupo àqueles que observavam o céu, os primeiros astrônomos?

Perguntas e respostas estão perdidas no tempo, mas é provável que estejam relacionadas a divindades, estruturas arquetípicas que permitiram a primeira inteligibilidade do mundo sob a forma mitológica. E, há seis mil anos, na mesma Mesopotâmia que integra o Crescente Fértil, o homem inventou a escrita e assim abriu as portas para a história.

1.2 A ESCULTURA DA HISTÓRIA

Os humanos, ao menos parte dos humanos, já podiam escrever quando pedras gigantes foram deslocadas com determinação e habilidade para construir Stonehenge (do inglês arcaico *stan* = pedra e *heng* = eixo) na planície de Salisbury, território atual da Inglaterra, há pelo menos 4.500 anos.

Stonehenge está identificado, agora, com um observatório astronômico, construído por homens cujos corpos se esfacelaram no tempo. E o único testemunho das pedras que sobrevivem em equilí-

brio foi o da antiga determinação que eles manifestaram de perscrutar o céu, talvez vigiando o deslocamento aparente do Sol, associado a cultos religiosos. Quanto às pirâmides, contemporâneas de Stonehenge, algumas expressam alinhamentos sugestivos com a disposição de estrelas como as que formam o cinturão de Órion.

Assim, Stonehenge, como as pirâmides egípcias ou da Mesoamérica, atestam o olhar humano para as estrelas, em busca de inteligibilidade e evidências do futuro.

Já as tábuas de argila cozida com os caracteres cuneiformes, a primeira forma de escrita, peças como as tábuas Mulapin, registram constelações bem definidas e reconhecíveis ainda hoje, caso de Escorpião e Leão. Mas os babilônios, os autores dessas primeiras impressões, foram ainda mais longe. Estabeleceram a duração do ano em 360 dias, fracionaram o céu em 360 graus, dividiram o grau em 60 porções e conceberam o dia de 24 horas.

Os babilônios foram um dos muitos povos que se estabeleceram na Mesopotâmia, região que hoje é majoritariamente território do Iraque. Outros ocupantes dessa região, entre os rios Tigre e Eufrates, incluíram assírios, sumérios, caldeus, acádios e amoritas, todos interessados nas terras férteis asseguradas pelos rios próximos onde nasceu a agricultura, ao final da última glaciação. De modo geral, esses povos politeístas com organização política centrada no rei ou imperador, tiveram economia baseada na agricultura e comércio, neste caso organizado na forma nômade de caravanas.

A ascensão da Babilônia se iniciou por volta de 1800 a.C. e terminou com a invasão hitita e o início do que ficou conhecido como “séculos obscuros”, período marcado pela ausência de documentação, em torno de 1530 a.C..

Entre o quarto e terceiro milênio antes de Cristo, a área meridional entre o Tigre e o Eufrates esteve controlada pelos sumérios e essa dominação estendeu-se pelo menos até 2350 a.C., quando os acadianos chegaram para se apossar do poder. Ao menos o poder político, não o cultural.

Como ocorre ainda hoje, essa região vasta e fascinante nunca foi pacífica. Em 1200 a.C. chegaram os assírios sob a forma de uma nova onda invasora. Mas se venceram pelas armas, não empanaram o brilho dos sumérios, reconhecidos como os verdadeiros criadores da escrita.

A Suméria teve cidades importantes, com forte influência em áreas próximas. Além de Ur, talvez a mais famosa delas, Lagash, fundada por volta de 6000 a.C., atingiu sua culminância por volta de 2350 a.C. com o nome de Gudeia.

Ur deve parte de seu prestígio à presença dos zigurates, estrutura em forma de torre formada por vários andares abrigando um santuário no topo. O mais notável deles foi dedicado à protetora da cidade, a deusa Nanna ou Sin. Técnicas arquitetônicas embutidas nos zigurates posteriormente foram adotadas pelos construtores do majestoso Parthenon – dedicado à deusa Atena, em Atenas, na Grécia. Os zigurates foram edifícios utilizados também na observação do céu, não como preocupações de compreender seu mecanismo, mas como fonte divinatória. Nesse estágio da História, astronomia e astrologia formavam um tronco único e inseparável.

Durante certo tempo a Babilônia, enquanto cidade-estado, foi uma espécie de satélite de Ur, mas com a decadência desse poder anterior, passou a primeiro plano e se transformou na maior cidade do mundo antigo, com área de dez mil hectares.

Tábuas cerâmicas com registros astronômicos de origem babilônica registram um universo de oito céus encaixados entre si. O céu das estrelas fixas dividia-se em três zonas de doze setores, associadas a estrelas e constelações. Mas o emprego de séries numéricas em progressão aritmética, primeira evidência de instrumentação matemática, permitiu aos babilônios a descrição de fenômenos periódicos como os eclipses lunares e solares.

Dois textos desse período referem-se a questões que hoje seriam astrológicas e astronômicas, não um corpo único e indissociável de conhecimento.

O texto astronômico, que interessa aqui, traz uma lista de datas relativas às posições de Vênus durante os 21 anos do reinado de Ammisaduga (1646-1626 a.C.) um século e meio depois de Hamurabi (1792-1750 a.C.), rei conhecido pelo código que leva seu nome e um dos mais antigos conjuntos de leis já encontrados.

1.3 ANTECIPAÇÃO DO FUTURO

Os dados astronômicos das tábuas cerâmicas estão relacionados ao calendário lunar, mas ligados a presságios sobre ocorrências políticas e fenômenos celestes.

A astronomia babilônica chegou à Grécia por volta de 500 a.C. envolta por esses conteúdos astrológicos, com preocupações de desvendar o futuro.

Mas os gregos o reinterpretariam com centro na compreensão de como funciona a máquina do Universo, ao contrário do que ocorria tanto na Mesopotâmia quanto no Egito.

Os egípcios tiveram uma relação de natureza quase que puramente utilitária com a astronomia, especialmente para a marcação do tempo. Talvez, como consideram alguns autores, para assegurar uma administração eficiente, preocupada em estabelecer critérios claros e eficientes como o recebimento de tributos em períodos bem definidos.

Os astrônomos egípcios, tanto quanto os babilônicos, não se envolveram com a elaboração de teorias sobre a natureza do Sol, da Lua, ou dos planetas, ainda que soubessem que os últimos se deslocavam em meio às estrelas fixas, expressão que denota uma compreensão do céu que se estendeu até a era do telescópio, no início do século 17. Como outros povos, antes e depois, os egípcios também organizaram a partilha do céu em diferentes regiões, como fazem as constelações atuais. Mas esse arranjo não se preservou para a posteridade.

No papiro funerário da princesa Nesitanebtashu, sacerdotisa de Amon Ra, em Tebas, atual Luxor – o mais largo encontrado até agora pelos arqueólogos (49,5 cm) datado de 970 a.C. – está gravada uma representação apenas simbólica do universo concebido pelos egípcios. E ele está ocupado por um grupo de deuses e deusas.

Esse e outros desenhos do mesmo tipo tiveram conteúdo evidentemente religioso, pois os astrônomos egípcios também eram sacerdotes. Os historiadores consideram que o motivo para a ausência de uma preocupação maior com descrição do céu e de astros como estrelas, planetas e mesmo a Lua, no Egito, justifica-se pelo fato de todo o interesse dos astrônomos-sacerdotes estarem relacionado à vida pós-morte, também ao contrário do que ocorreria na Grécia.

De qualquer maneira, os egípcios conceberam a duração do ano em 365 dias, divididos em 12 meses de 30 dias a que se acrescia 5 dias (epagômenos), com o objetivo de fazer coincidir o ano civil com o ano solar. No Egito antigo, a inundação periódica do rio Nilo, entre junho a setembro, por ação das chuvas abundantes, coincidia aproximadamente com o nascer helíaco (primeira aparição anual de um astro sobre o horizonte leste) de Sothis, ou Sirius (alfa do Cão Maior) e marcava o início do ano.

Outra contribuição interessante legada por eles são os decanos e aqui é necessário retornar ao conceito de nascer helíaco de uma determinada estrela que os egípcios consideraram como a última hora de uma noite. Eles elegeram 36 decanos, cada um deles representado pelo nascer helíaco de uma

estrela com duração de dez dias. Portanto, 36 decanos somam 360 dias escoando-se até a primeira das estrelas escolhidas voltasse ao nascer helíaco novamente. A diferença observada, já que o ano solar tem 365 dias, foi então devidamente ajustada a partir dessas observações que também ajudou na definição de um dia de 24 horas.

A base que sustenta a astronomia moderna, no entanto, a partir da revolução copernicana, em meados do século 16, é grega. Ou mais claramente, foi produzida na Grécia, mas com influências que se perdem no tempo, ainda que parte desse legado possa ser reconhecido.

Boa parte das constelações gregas são cópias quase exatas de concepções mesopotâmicas produzidas pelos diferentes povos que ocuparam essa região. As estrelas que formam as constelações zodiacais de Gêmeos e Capricórnio, por exemplo, eram conhecidas como “Grandes Gêmeos” e “Peixe-Bode” pelos assírios. Outras, ainda zodiacais, que hoje conhecemos como Áries e Peixes, eram conhecidas como “Trabalhador” e “Andorinha”. Assim, arqueoastrônomos e historiadores da ciência admitem que uma maioria significativa de constelações e asterismos, agrupamentos estelares como Plêiades, no interior do Touro, têm origem mesopotâmica.

A constelação boreal do Triângulo (*Triangulum*), por exemplo, limitada ao sul por Áries e Peixes, a oeste e norte por Andrômeda e a leste por Perseu e Áries, era conhecida entre os mesopotâmicos, de acordo com as gravações em placas cerâmicas, como o “Arado”.

1.4 GEOMETRIA NA GRÉCIA

Associado a conhecimentos astronômicos a partir dos gregos, a geometria – área da matemática que se ocupa do estudo do espaço e das figuras que podem preenchê-lo – era conhecida tanto na Mesopotâmia quanto no Egito, mas restrita a usos na engenharia. Teria sido levada para a Grécia por Tales de Mileto, o primeiro filósofo grego, e lá evoluiu para um sistema lógico complexo que culminou com “Os Elementos de Euclides”, em 300 a.C.. Historiados suspeitam que a constelação do Triângulo, visível a olho nu bem elevada ao Norte logo ao anoitecer em fins de dezembro – ou mais tarde, em meses anteriores – é o rebatismo grego de uma constelação mesopotâmica entre a época de Tales (624-547 a.C.) e de Eudóxio (406-355 a.C.).

Entre a produção intelectual grega mais antiga estão as obras dos poetas contemporâneos Homero (Íliada e Odisseia) e Hesíodo (Almanaque Agrícola), ambas do século 8 a.C.. E ambos fazem referência a duas constelações bem conhecidas – a equatorial Órion e a boreal Ursa Maior –, dois asterismos (Plêiades e Híades) e duas estrelas – Sirius, alfa do Cão Maior, a mais brilhante, e Arcturus, alfa do Boieiro, igualmente notável por seu brilho intenso –, mas não estendem além disso. O legado de Homero e Hesíodo faz com que historiadores da ciência especulem sobre um conhecimento limitado do céu em um período anterior a 500 a.C. entre os gregos.

Sobre o que não há dúvida é que, de um ponto de vista histórico, o primeiro relato completo do céu produzido na Grécia está representado no livro de Eudóxio, datado de 360 a.C., mas só conhecido indiretamente por obras de Arato, poeta e médico grego (315/310 – 239/240 a.C.) e Hiparco, um dos maiores astrônomos gregos que parece ter tido bom conhecimento da astronomia babilônica. Hiparco deixou um rico legado. Além de elaborar o primeiro catálogo estelar, ele determinou o comprimento do ano trópico, ou ano solar, período em que o Sol dá uma volta aparente em torno da Terra. Descobriu a precessão dos equinócios – cone formado por rotação do eixo da Terra no período de 25.800 anos – e irregularidades no movimento da Lua, além de aperfeiçoar instrumentos astronômicos. O conjunto de sua obra fez com que fosse preservado no *Almagesto* de Ptolomeu.

Eudóxio faz descrições sugerindo que estrelas próximas ao polo celeste norte se elevam pouco acima do horizonte – dependendo de época e latitude de um observador – e acrescenta que “quando o Escorpião se levanta no leste, Órion mergulha sob o horizonte no oeste”, referências que arqueoastrônomos julgam vagas para permitir conclusões mais promissoras quanto à latitude dessas observações. Essas referências, no entanto, sugerem que Eudóxio apenas reproduzia uma base de dados construída há mais de 700 anos. Bradley Schaefer, professor de física e astronomia da Universidade Estadual de Louisiana, nos Estados Unidos, envolvido com arqueoastronomia, sustenta que tanto as citações de Eudóxio, como as repetidas por Hiparco, remetem a registros do Mulapin, os registros cerâmicos mesopotâmicos datados de 1100 a.C., observados de uma latitude em torno de 36°.

Não se sabe em que época os gregos receberam o conjunto de constelações mesopotâmicas, ainda que o espaço de tempo aceitável para isso sugira um intervalo entre 1100 a.C. e 400 a.C., aproximadamente.

Mas existem pelo menos 18 constelações inconfundivelmente gregas. É o caso das constelações boreais de Hércules e Delfim, além da zodiacal Ofiúco. Seis delas se referem a mitos gregos relacionado ao resgate de Andrômeda por Perseu. O herói voltava para casa, depois de decapitar a medusa, quando avistou uma jovem acorrentada oferecida como sacrifício ao deus do mar, Cetus. A mãe da jovem, Cassiopeia, havia ousado comparar a beleza da filha à das filhas de Possêidon, deus supremo do mar. Como castigo Possêidon mandou Cetus destruir a cidade das mulheres e ofereceu mãe e filha ao sacrifício. Perseu decide salvar a jovem, desde que ela aceite casar-se com ele. Nesse momento, no entanto, uma vaga se abre e o monstro marinho aparece, ameaçador. Perseu enfrenta-o valendo-se da capacidade que tem de voar e vence a batalha. Com isso, os pais de Andrômeda permitem que ela se case com ele.

De qualquer maneira, a utilização das constelações entre os gregos teve mudanças ao longo do tempo. Começaram como referências a narrativas mitológicas, passaram a referências do calendário e auxiliaram especialmente em navegações e acabaram como base para localizações planetárias.

1.5 A SÍNTESE DE HIPARCO

Entre os gregos, Hiparco fez a transição de épocas que resultou numa síntese do passado remoto para um legado ao futuro. Ele descobriu uma estrela nova, em 134 a.C., no interior da constelação do Escorpião, o que o levou a preparar um catálogo completo de estrelas, concluído em 128 a.C., – lamentavelmente perdido –, para permitir futuras identificações dessa natureza. Foi com base nesses dados que ele se deu conta da precessão dos equinócios.

Em relação às constelações, com adaptações e inovações, basicamente elas foram produzidas no mundo mesopotâmico e transmitidas aos gregos, e, posteriormente, incorporadas por romanos, árabes e disseminados por toda a Europa, especialmente a partir do início do século 16.

Os árabes foram uma espécie de repositório do conhecimento clássico grego com o declínio da civilização grego-romana. Foram as traduções árabes que permitiram a recuperação dos avanços obtidos no passado e que, no Ocidente – com o início da Idade Média, no século 4º –, passou por um profundo retrocesso. Essa é uma evidência de que a ciência, como outras produções culturais

humanas, não é algo que possa ser entendido como um movimento uniformemente acelerado. Ao contrário disso, o percurso da civilização humana talvez possa ser comparado ao trajeto de um rio que corre para o mar. Em determinados trechos pode haver recuos, definidos por curvas fechadas, que o deslocam rumo à nascente, antes que retome a direção do mar.

No caso da astronomia – mas também da medicina e até da filosofia – o declínio da civilização grego-romana fez com que o centro de investigação fosse transferido para Bagdá, na Mesopotâmia de onde ela havia partido. Claudio Ptolomeu (90/100 d.C.-170 d.C.), astrônomo, astrólogo, matemático e geógrafo, foi um dos gênios gregos que tiveram suas obras traduzidas para o árabe. Pouco antes do ano 1000 d.C., o astrônomo persa Abderrahman Al-Sufi (903-986) produziu um catálogo onde as magnitudes das estrelas foram criteriosamente estabelecidas, competindo de certa forma em qualidade ao trabalho de Ptolomeu e mesmo de catálogos modernos. Al-Sufi fez esse trabalho para permitir futuras comparações de variações estelares. Seu trabalho expresso no Livro das Estrelas Fixas tem um dos mais antigos mapas celestes conhecidos, incluindo o desenho das constelações.

Amplamente reproduzido, o trabalho de Al-Sufi foi uma das obras mais populares entre os livros árabes de astronomia. As obras gregas foram reintroduzidas na Península Ibérica entre os séculos 10 e 13 com as invasões árabes e, posteriormente, traduzidas quase sempre por intelectuais judeus.

Na Grécia, no entanto, essa base de astronomia e matemática – particularmente a geometria – ampliada e sofisticada teve contribuições de nomes bem conhecidos da história da ciência. É o caso de Euclides ou de astrônomos como Eratóstenes (276 a.C.-196 a.C.), também geógrafo e o primeiro a medir a circunferência da Terra com precisão notável em relação ao estabelecido hoje. Aristarco de Samos (310 a.C. – 230 a.C.) foi pioneiro em afirmar que a Terra gira em torno do Sol e não o contrário quinze séculos antes de Nicolau Copérnico. Aristarco também calculou as distâncias entre a Terra e o Sol e Terra e Lua e estimou, surpreendentemente, um volume de Universo compatível ao aceito pela ciência moderna entre os anos 1920 e 1930, época da consolidação da cosmologia.

Foi esse conjunto de conhecimentos, recuperado e reinterpretado pelo religioso, médico e astrônomo polonês, Nicolau Copérnico (1473-1543), que construiu os fundamentos da astronomia moderna, ampliada e consolidada por homens como Galileu Galilei, Johannes Kepler, Tycho Brahe, Isaac Newton e, mais recentemente, William Herschel já no século 19 e Albert Einstein e Edwin P. Hubble, no século 20.

O Universo, neste início do século 21, é entendido como originário de uma explosão primordial (Big Bang) que pode tanto ser única como repetida. No último caso, o Universo se expandiria e contrairia ao longo do tempo, num movimento de diástole e sístole cósmicos, e seria eterno. Além disso, o Universo pode não ser único, mas apenas um entre vários. Ao menos para a cosmologia de Multiversos.

Criaturas que os astrônomos chamam hoje de “animais do zoológico cósmico” são tão exóticas quanto surpreendentes e essa classificação inclui matéria escura, substância que não interage com a luz e por isso mesmo é invisível, ainda que denuncie sua presença por interações gravitacionais. Energia escura parece algo ainda mais estranho por ser uma espécie de antigravidade, ou gravidade negativa, que acelera o movimento de expansão cósmica. Buracos negros, capazes de dragar toda forma de matéria e energia no interior de uma região crítica – o horizonte de eventos – estrelas de nêutrons e curvatura do espaço e do tempo são conceitos que fascinam mesmo crianças em idade escolar.

1.6 O CÉU DO NOVO MUNDO

Mas a investigação do céu que nos trouxe a esse estágio especulativo não ficou restrita ao Oriente. Quase ao mesmo tempo em que diferentes povos interagiram na Mesopotâmia, como ocorreu com os assírios que conquistaram os sumérios, em 1200 a.C., na América Central, culturas brotavam com vigor durante muito tempo inesperado. Foi o que ocorreu com os olmecas, entre 1200 a.C. e 400 a.C.. Esse povo mesoamericano erigiu cidades-estados – como foram Ur e mesmo Babilônia – e estabeleceu relações comerciais com regiões distantes, o que pressupõe infraestrutura sofisticada, além de coesão e expressão políticas significativas.

Numa analogia com o que ocorreu na Grécia clássica, que influenciou profundamente outras culturas, na América os olmecas estiveram na base da história dos maias, zapotecas e teotihuacanas e, posteriormente, toltecas e astecas.

A cultura maia foi a mais duradoura e, a rigor, não se esgotou. Ainda hoje descendentes desse povo sobrevivem em territórios, especialmente do México, além de Guatemala, Belize e Honduras, expressando-se em dialetos que sobreviveram à violência física e cultural da conquista espanhola,

desde fins do século 15. Entre 250 e 900 d.C., os maias tiveram seu ápice, quando construíram cidades sofisticadas, guarnecidas com palácios e templos religiosos.

A astronomia foi uma das áreas em que os maias se expressaram com maior vigor e criatividade. Eles registraram movimentos de objetos celestes com precisão acima de culturas que foram suas contemporâneas. Também desenvolveram a escrita, esculpida ainda hoje em edifícios e monumentos: as estelas.

Mas, o que esteve gravado em papel, produzido a partir de cascas de árvores, foi destruído pelos espanhóis para quem esses povos tinham “parte com o demônio” e eram pouco mais que selvagens ignorantes. O testemunho de um padre espanhol, Diego de Landa, dá mostra dessa destruição bárbara em uma fala que ficou registrada pela História: “encontramos um grande número de livros que não continham nada, a não ser superstições e falsidades do demônio, os destruímos e queimamos, o que provocou neles grande pesar e muita dor.”

Embora tenham sido chamados de “códices”, esses livros maias tinham apenas a forma de equivalentes europeus, mas eram confeccionados com longas tiras retiradas da parte interna da casca da figueira, ou mesmo fibras de outras plantas que, para serem utilizadas, recebiam antecipadamente uma camada de cal.

O códice de Dresden – identificado como preciosidade maia num museu dessa cidade da ex-Alemanha Oriental – é o mais conhecido desses documentos que existiram aos milhares, acompanhados de ricas ilustrações, destruídos pelo fogo, enterrados ou simplesmente atirados ao mar sob as ordens de Diego de Landa.

A destruição desse tesouro é hoje um dos principais obstáculos a um conhecimento mais profundo e detalhado do que foi a cultura maia e, para os mesoamericanos, equivale a uma perda tão profunda quanto à destruição da Biblioteca de Alexandria, fundada por Alexandre Magno, discípulo de Aristóteles, e que, no seu apogeu, pode ter reunido perto de 700 mil pergaminhos.

De muitas maneiras, ambas representam uma perda irrecuperável não apenas da produção cultural de povos mais ou menos relacionados, mas de um atentado à memória de toda a humanidade. No passado, no presente e no futuro.

Outro dos poucos documentos maias que escaparam à sanha da destruição alimentada por resistência à diversidade e estreitamente religioso foi o livro do gene maia, o Popol Vuh. Ele só não foi perdido porque acabou copiado clandestinamente, em caracteres latinos, por um religioso maia

numa época em que a escrita original desse povo esteve proibida. Essa cópia acabou descoberta em 1702, na Guatemala por outro religioso, um espanhol, que a preservou. O Popol Vuh mostra que, como ocorreu com outros povos, a mitologia maia está profundamente associada ao céu. O deslocamento de corpos celestes como o Sol, a Lua, e do planeta Vênus, entre os maias, foram identificados aos deuses e eles deveriam ser sempre apaziguados. Assim, da mesma forma que na Mesopotâmia, também a astronomia maia esteve íntima e indissociavelmente relacionada a motivos religiosos e a tentativas de previsão do tempo futuro.

1.7 INVASÕES BÁRBARAS

Os maias conceberam o Universo como uma estrutura plana e quadrada com o Sol girando em torno da Terra, composto por três planos: o submundo, a terra e o céu. Na interpretação moderna, o submundo reflete a geografia e geologia locais, sem qualquer associação com o submundo cristão referido como inferno. O Sol subjugava o céu e a janela escura da noite exibia claramente a ação dos deuses.

Os maias desenvolveram calendários precisos para definir não apenas o ano solar, mas também festividades religiosas, pela observação em especial de Vênus e também da Lua. Vênus, associado a mitos de criação maia, foi tomado como referência para definição de datas de enfrentamentos rituais, jogos e sacrifícios humanos.

Se os códices maias foram destruídos com relativa facilidade pela ainda hoje chocante intolerância espanhola, os edifícios resistiram, ao menos em parte, e ainda hoje surpreendem pela sofisticação e conexão com motivos astronômico-religiosos. A pirâmide de Kukulcán, dedicada ao deus Serpente Emplumada, na antiga cidade de Chichén-Itzá, no estado de Yucatán, por exemplo, tem cada uma de suas faces voltadas para um ponto cardeal. E os 52 painéis esculpidos em suas paredes refletem ciclos de criação e destruição do mundo segundo a tradição maia.

Os maias surpreendem pela sofisticação astronômica e arquitetônica, entre outras características de uma cultura que em muitos aspectos se compara ou se sobrepõe às mesopotâmicas. Mas, ainda assim, no Novo Mundo, não foram os únicos povos a se ocupar da observação celeste, criação de cosmologias e reconhecimento particular do céu.

Muitas outras etnias indígenas se ocuparam de investigar o céu e fazem isso ainda hoje. Os ianomâmis (etimologicamente "os construtores de casas"), de uma família formada por quatro línguas próximas e a nenhum tronco linguístico da América do Sul, acreditam que o céu comporta uma estrutura muito antiga e fraturada que deixa vaziar a água de um lago superior, sob a forma de chuvas. E, surpreendentemente, de onde pode cair peixes... Essa estrutura antiga e fraturada, segundo os ianomâmis, está apoiada em pilares guardados por feiticeiros de seu povo. Se esses feiticeiros forem mortos, advertem eles, os pilares desabarão e todo o céu virá abaixo, com o fim do mundo conhecido.

Na verdade, e isso é importante de ser considerado, o que ocorre aqui, como é comum em toda a mitologia, é um recurso à metáfora, à alegoria. Os ianomâmis, índios de porte médio, costumam construir suas aldeias em áreas remotas, além de corredeiras de difícil acesso ou afastados de comunidades de não índios. O dia em que seus pajés estiverem mortos é, de alguma maneira, o dia em que suas aldeias estiverem ameaçadas ou já destruídas. O que significa dizer de um dia, possível, em que a Terra estará arruinada e nem o céu tiver mais o sentido que teve ao longo de toda a história humana.

O mito, no entanto, pode ser parcialmente explicado com a mesma lógica que suporta a ciência moderna. Ocorre que, na Amazônia brasileira e venezuelana, habitada por eles, fenômenos atmosféricos como tornados podem sugar a água de rios e lagos em determinados pontos e depositar esses conteúdos em outros, o que inclui peixes e dá aos ianomâmis a demonstração de que necessitam para sustentação essa estrutura mitológica.

Construtores de extensas redes de trilhas na floresta, os ianomâmis se orientam pelo céu para retornar às aldeias mesmo percorrendo centenas de quilômetros de distância. Eles também reconhecem a posição de determinadas constelações ou asterismos para definir épocas em que, por exemplo, os macacos, de que se alimentam com satisfação, estão gordos. A posição das plêiades no céu, logo ao anoitecer, é um desses indicativos.

O mesmo ocorreu e ainda ocorre com aproximadamente uma centena de etnias indígenas brasileiras, sem contar algumas dezenas de povos isolados, neste caso grupos menores, cujos ancestrais tiveram experiências negativas de contato com não índios no passado (os "brancos" caracterizados pela mídia influenciada pelos filmes de faroeste americanos) e agora preferem o isolamento.

O paranaense Germano Afonso, talvez o único etnoastrônomo no Brasil, tem demonstrado com um sensível e extenso trabalho de documentação que povos indígenas, além de bons conhecedores

do ambiente em que vivem, associam estações do ano e fases da Lua ao clima, à fauna e região em que vivem. Para esses povos, cada elemento da Natureza tem um espírito protetor e as ervas medicinais são preparadas segundo um rigoroso calendário anual, baseado na paciente observação do céu.

Os povos do tronco tupi-guarani, por exemplo, baseados na observação lunar, definem os períodos mais propícios à caça – os animais ficam mais agitados com a iluminação intensa da lua cheia – e mesmo o corte de madeiras, entre outras práticas que levam em conta a evolução cotidiana do céu.

Uma pesquisa histórica, envolvendo cada uma das culturas já extintas ou ainda vivas nas mais diferentes regiões da Terra, mostra que cada uma delas leu o céu à sua maneira. Mas todas, sem exceção, elevaram os olhos para observar as estrelas.

Instrumentos e técnicas astronômicas

Roberto D. Dias da Costa

2.1 INTRODUÇÃO

2.2 A NATUREZA DA LUZ

2.2.1 A LUZ COMO RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

2.2.2 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

2.2.3 A RADIAÇÃO TÉRMICA E O ESPECTRO DO CORPO NEGRO

2.2.4 ESPECTROSCOPIA E AS LEIS DE KIRCHHOFF

2.2.5 A ATMOSFERA DA TERRA E A INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO

2.3 TELESCÓPIOS

2.3.1 CONCEITOS BÁSICOS

- Abertura
- Resolução angular ou poder separador
- Distância focal e razão focal
- Magnificação

2.3.2 TELESCÓPIOS REFRACTORES, REFLECTORES E CATADIÓPTRICOS

2.3.3 DETECTORES DE LUZ: DAS PRIMEIRAS CÂMERAS AOS CCDs

2.3.4 RADIOTELESCÓPIOS

2.3.5 TELESCÓPIOS NO ESPAÇO

2.3.6 OBSERVATÓRIOS ASTRONÔMICOS

2.4 A INFORMAÇÃO QUE NÃO CHEGA PELA LUZ

2.4.1 MATERIAL DO SISTEMA SOLAR: METEORITOS E COLETA LOCAL

2.4.2 DETECTORES DE NEUTRINOS

2.4.3 DETECTORES DE RAIOS CÓSMICOS

2.4.4 DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

2.1 INTRODUÇÃO

O céu sempre fascinou os humanos. A regularidade dos movimentos do Sol e da Lua, a beleza distante das estrelas, os eventos efêmeros e os objetos que se movem entre os astros encantaram e perturbaram nossos ancestrais, desde a aurora da civilização.

A astronomia moderna, baseada na física e com o apoio da tecnologia, permite que o céu seja investigado em níveis sofisticados de detalhamento, privilégio das gerações atuais. Além disso, possibilita que a informação proveniente de corpos celestes seja analisada de maneira que o céu se transforme em um fascinante laboratório, onde processos físicos impossíveis de serem reproduzidos na Terra são observados, analisados e desvendados.

Neste capítulo serão abordados os instrumentos utilizados em astronomia para analisar a informação que chega até nós. Será examinada a natureza da luz, fonte da maioria das informações que recebemos sobre os corpos celestes. A luz, compreendida como radiação eletromagnética, chega até nós em diversas faixas de comprimento de onda: dos raios gama às ondas de rádio, passando pela faixa estreita da luz visível.

Aqui, vamos tratar da natureza da luz, além do conceito de espectro eletromagnético, com descrição da técnica denominada espectroscopia. Também serão consideradas as interações da atmosfera da Terra com a radiação que a atravessa.

Posteriormente, uma revisão dos conceitos fundamentais da óptica iniciará a descrição dos telescópios, instrumentos essenciais para a observação astronômica. Serão detalhados seus tipos principais, localização na Terra ou no espaço e a instalação de telescópios profissionais em grandes observatórios. Serão também descritas as técnicas de imagem que permitem o registro das observações, análise detalhada, armazenamento e divulgação.

Finalmente serão consideradas as técnicas de coleta de informações astronômicas que não dependem da radiação eletromagnética: dados obtidos por sondas espaciais ou a partir de meteoritos. Essas fontes fornecem informações importantes sobre a estrutura e composição do Sistema Solar. Detectores de neutrinos revelam informações sobre os processos de fusão nuclear que ocorrem em núcleos estelares, raios cósmicos produzidos em regiões remotas do Universo interagem com a atmosfera superior e podem ser detectados no solo. Para concluir, abordaremos a radiação gravitacional.

1- Rara foto de um arco-íris primário e secundário, com um terceiro ao fundo. Todos podem também ser vistos refletidos na água (crédito: NASA).



2.2 A NATUREZA DA LUZ

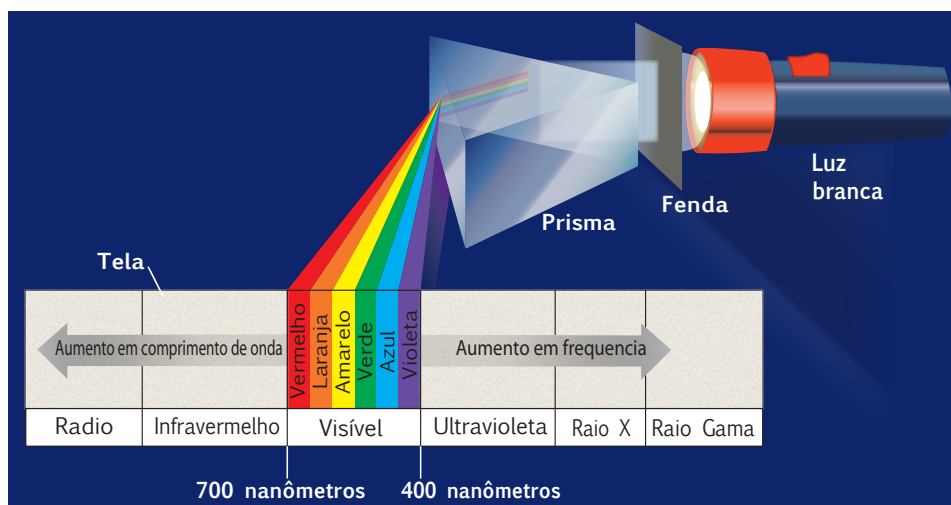
2.2.1 A LUZ COMO RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A luz foi objeto de discussão entre físicos e filósofos ao longo de séculos. Sua verdadeira natureza, onda ou partícula, foi tema de debates acalorados. Ainda na Antiguidade Clássica, o matemático Euclides, considerado o pai da geometria, descreveu as propriedades da luz, sua propagação em linha reta e as características da reflexão. Esses problemas foram considerados por pensadores tão distintos quanto o médico persa Ibn Sina (Avicena) e o filósofo francês René Descartes.

No final do século 17, a chamada teoria ondulatória da luz foi formulada por distintos cientistas europeus como Robert Hooke e Christiaan Huygens. Experimentos de difração da luz feitos por Thomas Young e mais tarde por Jean-Augustin Fresnel confirmaram que a teoria ondulatória poderia explicar diversos resultados experimentais. Em contraponto existia também uma teoria corpuscular para a luz. Isaac Newton acreditava que a luz era composta de pequenas partículas e fez diversos experimentos em óptica, publicados no livro *Opticks*, que saiu em 1704. O debate entre as duas hipóteses perdurou até meados do século 19, quando a teoria corpuscular clássica foi temporariamente descartada. Ela só retornou no século 20, pelas mãos de Albert Einstein, expressa no efeito fotoelétrico que rendeu a ele o Prêmio Nobel de Física em 1921.

A luz tem um comportamento surpreendente, a dualidade onda-partícula. Ela exibe ao mesmo tempo propriedades ondulatórias como refração, difração e interferência, além de propriedades corpusculares como o efeito fotoelétrico, que depende exclusivamente da energia dos fótons incidentes, os “grãos” de luz.

Em 1845 o físico-químico inglês Michael Faraday (1791-1867) descobriu que o plano de polarização da luz é alterado na presença de um campo magnético. Esse resultado surpreendente inspirou o físico matemático também inglês James Clerk Maxwell (1831-1879) a investigar a natureza da luz como forma de radiação eletromagnética. Seus trabalhos resultaram numa descrição matemática rigorosa das propriedades da radiação eletromagnética, incluindo a luz, sintetizadas nas chamadas equações de Maxwell, que descrevem o comportamento dos campos elétricos e magnéticos. As pre-



2- Faixas de energia da radiação eletromagnética

dições teóricas de Maxwell foram confirmadas experimentalmente pelo físico alemão Heinrich R. Hertz (1857-1894) por experimentos envolvendo a emissão de ondas de rádio. Ele demonstrou que as ondas eletromagnéticas comportam-se exatamente como a luz visível e exibem as mesmas propriedades como refração, difração, reflexão e interferência.

A partir dos resultados de Hertz foi possível incluir a descrição das propriedades da luz no corpo das propriedades das ondas eletromagnéticas: a luz é energia, e pode ser descrita com o mesmo instrumental matemático usado para tratar todas as faixas de energia da radiação eletromagnética, das altas energias como os raios gama e os raios X até as faixas de baixa energia como as ondas de rádio.

2.2.2 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Num arco-íris a decomposição da luz branca do Sol em suas componentes é um fenômeno natural provocado pela refração da luz em gotículas de água na atmosfera. Essa é uma visão simples e clara de como o espectro eletromagnético se divide dentro da faixa de energia que nossos olhos detectam.

Este efeito foi reproduzido pela primeira vez em laboratório por Newton ao redor de 1670: tomando a luz do Sol que entrava por uma fresta nas cortinas de seu laboratório e fazendo-a passar por um prisma, ele obteve a decomposição da luz em suas cores constituintes, no mesmo padrão de cores do arco-íris.

Agora, o espectro eletromagnético é dividido em faixas de energia e a luz visível é apenas uma delas. A figura 2 mostra as faixas de energia em que a radiação eletromagnética é dividida. Pode-se notar que a luz visível corresponde a apenas uma pequena faixa do espectro total.

A energia de um fóton é dada pela expressão:

$$E = h\nu \quad (1)$$

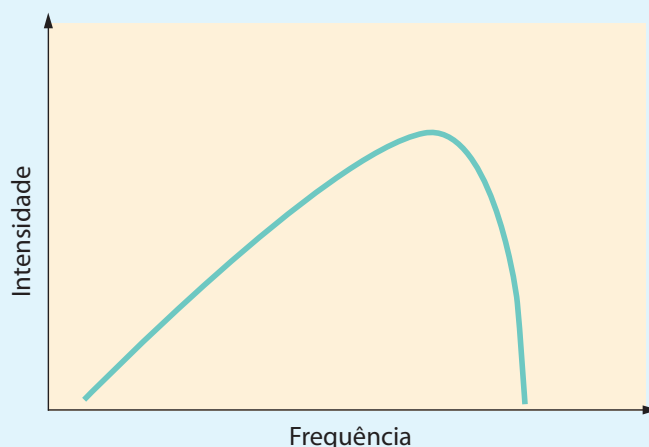
onde:

E : energia em joules (J)

h : constante de Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ J.s

ν : frequência do fóton em hertz (Hz)

3- Distribuição da intensidade de radiação em função da frequência de um corpo negro (crédito: Chaisson & McMillan).



Analogamente, a energia pode ser expressa em termos do comprimento de onda da radiação em vez de sua frequência:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

onde:

E : energia em joules (J)

h : constante de Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ J.s

c : velocidade da luz = 3×10^8 m/s

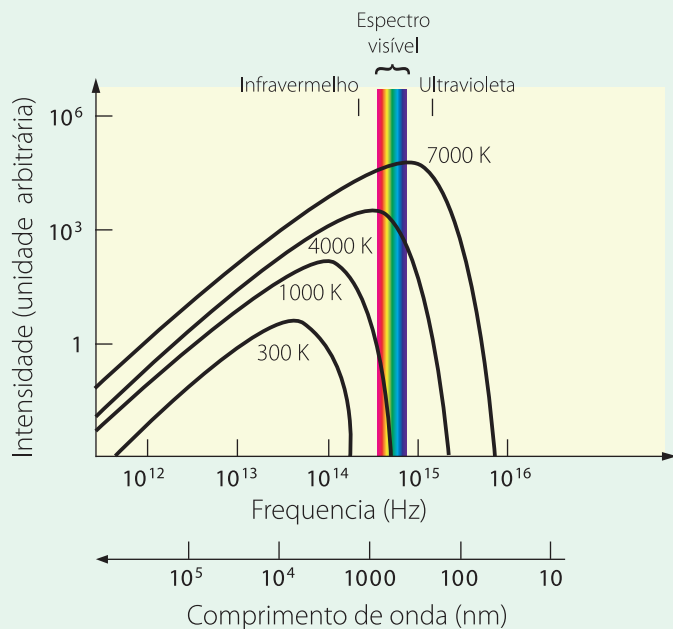
λ : comprimento de onda em metros (m)

Todas as fontes de luz emitem energia numa faixa de frequências (ou de comprimentos de onda). A distribuição espectral de energia de uma fonte define seu espectro eletromagnético. Todos os corpos emitem um espectro de radiação: a faixa das baixas frequências são as ondas de rádio como emissões de TV, rádio AM e FM, radar e micro-ondas. Próxima a elas está faixa da radiação infravermelha, percebida como calor e que é emitida pelos nossos corpos, por exemplo. Na faixa das altas energias, acima da luz visível, estão a radiação ultravioleta, os raios X e os raios gama.

2.2.3 A RADIAÇÃO TÉRMICA E O ESPECTRO DO CORPO NEGRO

Todos os corpos, sem exceção, emitem radiação. Isto não depende de seu tamanho ou forma, nem mesmo de sua temperatura, desde que esteja acima do chamado “zero absoluto”, ou a $-273,15^\circ\text{C}$. Isso ocorre porque, do ponto de vista microscópico, a temperatura é uma medida da agitação de átomos e moléculas que compõem o corpo, e esse movimento não cessa. A temperatura de um corpo é a medida dessa energia interna: quanto mais quente o corpo, maior o movimento das partículas que o compõem.

Em 1900 o físico alemão Max Planck (1858-1947) definiu a lei que rege a emissão térmica, agora conhecida como curva de Planck ou curva de corpo negro. O termo “corpo negro” é um con-



4- Diversas curvas de corpo negro superpostas. Notar que as curvas correspondentes às temperaturas mais elevadas têm seus máximos em comprimentos de onda menores (ou frequências maiores) [crédito: Chaisson & McMillan].

ceito físico e define um objeto ideal, que absorve toda a radiação que incide sobre ele, sem refletir nada. Nessas condições, emite um espectro que depende apenas de sua temperatura efetiva.

O comprimento de onda do máximo de intensidade para uma curva de corpo negro é dado pela Lei de Wien, formulada em 1892 pelo físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928), uma ferramenta importante em astronomia. Ela permite obter a temperatura na superfície de uma estrela a partir da medida do comprimento de onda do máximo de intensidade. A Lei de Wien pode ser expressa como:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (3)$$

onde:

$\lambda_{\max}$: comprimento de onda do máximo de intensidade, em metros

b : constante de deslocamento de Wien = 0.002897 m.K

T : temperatura em kelvins

Outra expressão útil em astronomia baseada nas propriedades da emissão térmica dos corpos é a Lei de Stefan-Boltzmann, que fornece o fluxo de energia por unidade de área de um corpo negro. Essa lei é muito utilizada em astrofísica já que as estrelas se comportam, aproximadamente, como corpos negros:

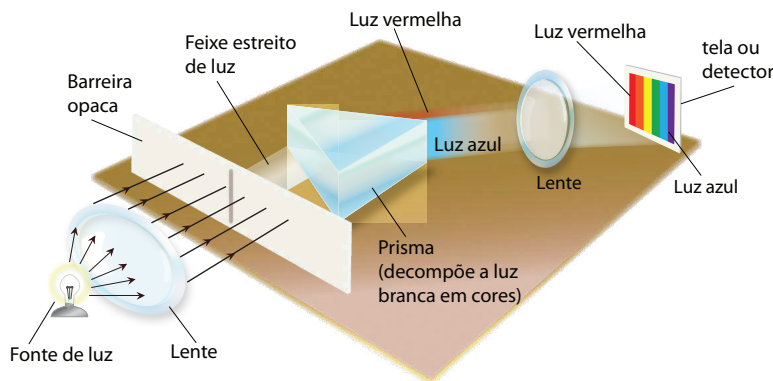
$$F = \sigma T^4 \quad (4)$$

onde:

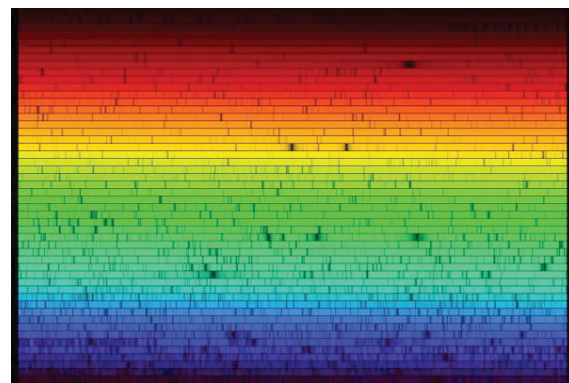
F : fluxo de energia por unidade de área de um corpo negro, por segundo

σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

T : temperatura do corpo negro em kelvins



5- Esquema básico de um espectrógrafo (crédito: Chaisson & McMillan).



6- Espectro do Sol. A sequência de cores da azul ao vermelho representa a distribuição de cores da luz visível do Sol, divididas em cerca de 50 "fatias" horizontais, cada uma representando uma faixa de comprimentos de onda. As pequenas faixas escuras verticais são linhas ou bandas de absorção, cada uma delas provocada pela presença de um determinado íon ou molécula na superfície do Sol (crédito: Nigel Sharp – NOAO).

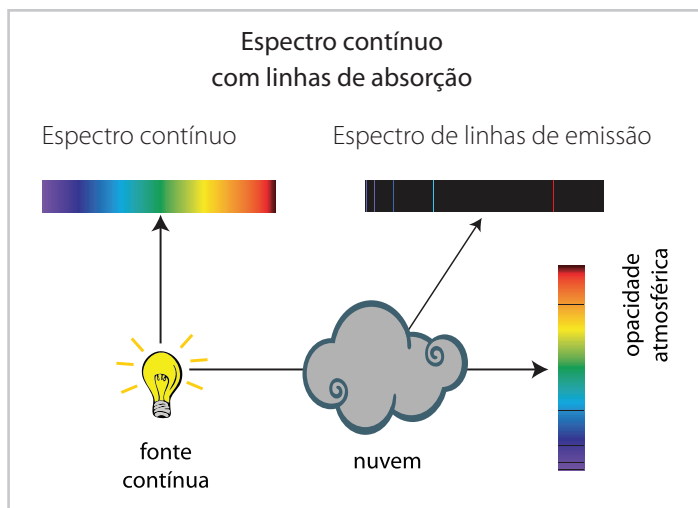
2.2.4 ESPECTROSCÓPIA E AS LEIS DE KIRCHHOFF

A espectroscopia é uma das mais poderosas ferramentas astronômicas. Auguste Comte, fundador do Positivismo, considerou que a composição química das estrelas seria desconhecida para sempre já que não se poderia ir até uma delas e coletar material para essa demonstração. Hoje continua impossível, mesmo uma sonda, aproximar-se do Sol ou de qualquer outra estrela. Mas, usando espectroscopia, é possível conhecer a composição química delas com boa precisão.

A análise da composição química estelar é feita com um espectrógrafo, equipamento que decompõe a luz de forma análoga ao experimento clássico de Newton: a luz passa por uma fenda e, a seguir, por um sistema óptico onde é decomposta. Assim se chega à distribuição espectral de energia da fonte, com informação sobre a composição química já que distintos íons de cada substância presente no corpo emissor da luz deixam sua "impressão digital" no espectro emitido.

Espectros de estrelas como o Sol apresentam uma emissão contínua superposta com linhas de absorção. Já outros objetos astronômicos, como as nebulosas, mostram espectros bem diferentes: sua energia não é emitida num contínuo, mas em linhas de emissão bem determinadas. Em meados do século 19 o físico alemão Gustav Kirchhoff (1824-1887) realizou uma série de experimentos com sólidos e gases aquecidos em diferentes condições de temperatura e pressão e a partir dos resultados obtidos formulou três leis que descrevem o tipo de espectro emitido por uma fonte. Elas são conhecidas como Leis de Kirchhoff da espectroscopia:

1. Um sólido ou líquido aquecido, ou ainda um gás suficientemente denso, emite energia em todos os comprimentos de onda, de modo que produz um espectro contínuo de radiação.
2. Um gás quente de baixa densidade emite luz cujo espectro consiste apenas de linhas de emissão características da composição química do gás.
3. Um gás frio de baixa densidade absorve certos comprimentos de onda quando uma luz contínua o atravessa, de modo que o espectro resultante será um contínuo superposto por linhas de absorção características da composição química do gás.



7- Leis de Kirchhoff da espectroscopia

2.2.5 A ATMOSFERA DA TERRA E A INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO

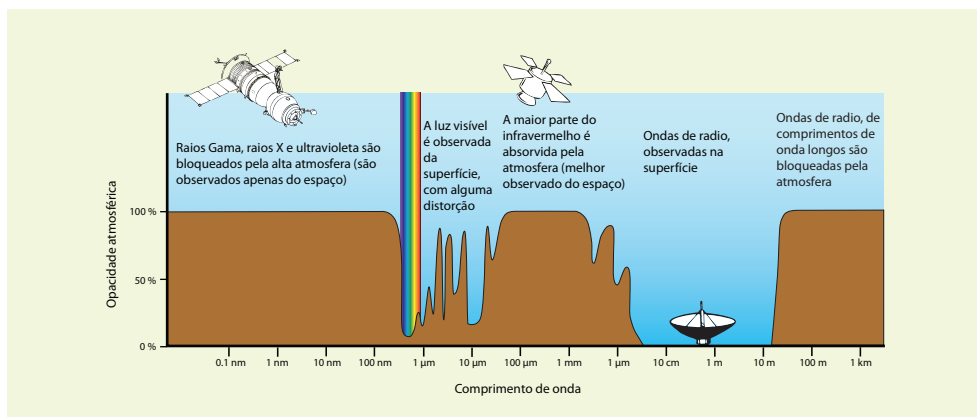
A atmosfera da Terra é uma mistura de gases que interage com a radiação que a atravessa de modo bem conhecido. A opacidade atmosférica define “janelas” de observação: alguns comprimentos de onda, em especial os raios X e os raios gama, são quase inteiramente absorvidos pela atmosfera. Foi essa característica que permitiu a evolução da vida já que essas faixas de radiação são nocivas às moléculas orgânicas.

Devido a essas propriedades de transmitância da atmosfera é fácil concluir a razão das observações astronômicas na faixa dos raios X e gama serem feitas por satélites.

Mas a opacidade é apenas uma das maneiras pelas quais a atmosfera interage com a radiação dos corpos celestes que atinge a Terra. Outra forma bem evidente de interação é a difusão atmosférica: na faixa da luz visível a atmosfera espalha preferencialmente comprimentos de onda mais curtos, ou seja, a luz azul, e deixa passar com mais eficiência os comprimentos de onda maiores, como o amarelo e o vermelho. Essa é a razão de o céu ser azul durante o dia.

Outra interação importante da atmosfera com a radiação é provocada pela turbulência. A atmosfera não é estática, o ar se desloca em células de convecção de diferentes tamanhos, desde pequenas estruturas com metros de diâmetro próximas ao solo até grandes formações, com quilômetros de diâmetro na atmosfera superior. O efeito dessa turbulência na visualização dos corpos celestes é a degradação da qualidade das imagens astronômicas. Em telescópios de pequeno porte, usados em astronomia amadora, a turbulência pode ser notada pelo “tremor” das imagens, que parecem oscilar quando observadas. Já nos grandes telescópios profissionais o mesmo efeito aparece na forma de perda de qualidade da imagem, que se tornam levemente borradas.

Além disso, mesmo a atmosfera tem uma determinada temperatura efetiva, e, portanto existe uma emissão atmosférica na forma da radiação de um corpo negro cujo máximo está no infravermelho. Devido a essa propriedade, as observações astronômicas nessa faixa são muito complexas e exigem refrigeração eficiente de todo o sistema de imageamento, incluindo a câmera, o detector e o próprio telescópio.

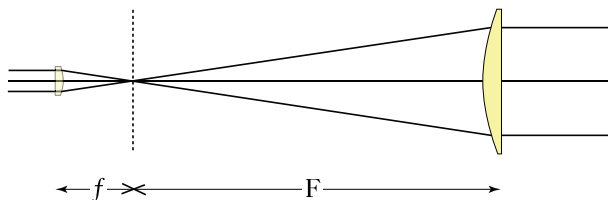


8- Opacidade da atmosfera da Terra em função do comprimento de onda da radiação. Pode-se ver que a atmosfera é totalmente opaca à radiação de alta energia (ultravioleta, raios X e gama), parcialmente transparente no visível e no infravermelho próximo, opaca na faixa das ondas de rádio milimétricas, transparente novamente na faixa das ondas métricas e novamente opaca para as ondas muito longas (crédito: NASA).

2.3 TELESCÓPIOS

2.3.1 CONCEITOS BÁSICOS

Um telescópio é essencialmente um funil para coleta de luz: quanto maior sua área, maior a quantidade de luz recolhida, e dependendo da óptica, melhor as imagens obtidas. Existem diversos conceitos básicos de óptica envolvidos no funcionamento de um telescópio. Vamos examiná-los:



9- Diagrama básico de um telescópio. A luz entra pela lente convergente à direita, chega ao plano focal à distância F da objetiva e sai pela ocular da esquerda, cuja distância focal é f .

• Abertura

É o diâmetro da objetiva do telescópio no caso dos refratores. Ou o diâmetro do espelho primário no caso dos refletores.

• Resolução angular ou poder separador

Esse é o mínimo ângulo no céu que um telescópio consegue distinguir. Quanto maior a resolução angular, menores os detalhes de um objeto que o telescópio poderá resolver. Matematicamente, a



10- Telescópio refrator de Galileo (à direita) e telescópio refletor de Newton (à esquerda), dois dos primeiros telescópios construídos.

resolução angular pode ser expressada, desprezando-se o efeito da atmosfera da Terra ou defeitos na óptica, por:

$$\alpha_R = \frac{138}{D} \quad (5)$$

onde:

α_R : resolução angular em segundos de arco

D : abertura do telescópio em milímetros

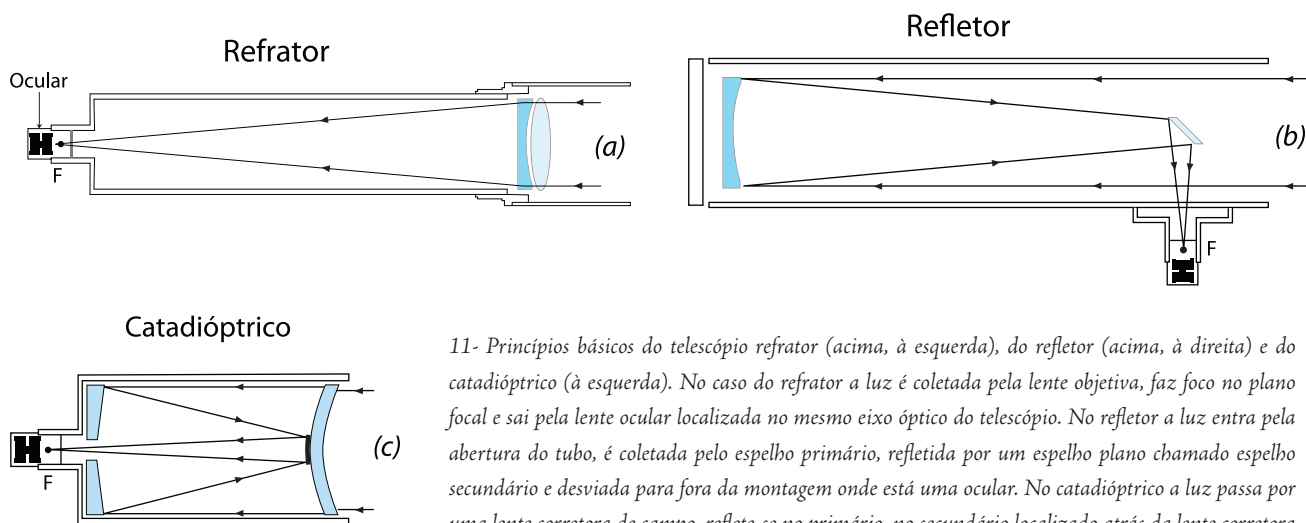
Essa expressão diz, por exemplo, que com um telescópio de 10 cm de diâmetro é possível distinguir detalhes de 1,38 segundo de arco. Já com um telescópio de 30 cm de diâmetro, em princípio, pode distinguir detalhes de 0,46 segundo de arco.

• Distância focal e razão focal

A distância focal de uma lente convergente (ou de um espelho côncavo, no caso dos telescópios refletor) é uma medida de como se dá a convergência da luz. Para uma dada ocular, distâncias focais pequenas implicam em aumentos maiores, porém em campos de visão menores no céu. A razão focal é a razão entre a distância focal e o diâmetro de uma lente ou espelho. Para uma dada abertura, razão focal menor implica em campo de visão maior no céu.

• Magnificação

É o poder de aumento de um telescópio. Ela é dada pela razão das distâncias focais da objetiva e da ocular de um telescópio. Com frequência as pessoas se surpreendem quando descobrem que um telescópio profissional com vários metros de diâmetro aumenta tanto ou menos que pequenos instrumentos usados em astronomia amadora. Isso ocorre porque o poder de resolução é o parâmetro fundamental que define a qualidade de um telescópio. Instrumentos pequenos que acenam com centenas de magnificações não são promissores para a astronomia.



11- Princípios básicos do telescópio refrator (acima, à esquerda), do refletor (acima, à direita) e do catadióptrico (à esquerda). No caso do refrator a luz é coletada pela lente objetiva, faz foco no plano focal e sai pela lente ocular localizada no mesmo eixo óptico do telescópio. No refletor a luz entra pela abertura do tubo, é coletada pelo espelho primário, refletida por um espelho plano chamado espelho secundário e desviada para fora da montagem onde está uma ocular. No catadióptrico a luz passa por uma lente corretora de campo, reflete-se no primário, no secundário localizado atrás da lente corretora e então é dirigida para a ocular por um orifício no espelho primário.

$$M = \frac{F}{f} \quad (6)$$

onde:

M : magnificação, ou número de vezes que o telescópio aumenta.

F : distância focal da objetiva

f : distância focal da ocular

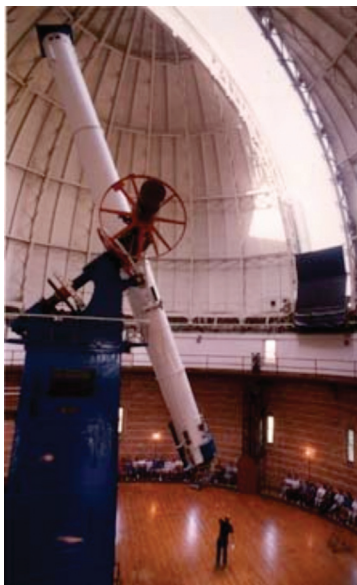
Dessa expressão pode-se concluir que o mesmo equipamento pode produzir imagens com aumento diferente, bastando para isso trocar a ocular. Normalmente os telescópios têm jogos de oculares intercambiáveis.

2.3.2 TELESCÓPIOS REFRACTORES, REFLETORES E CATADIÓPTRICOS

Em 2009 completou-se 400 anos que Galileo usou o primeiro telescópio astronômico. Tratava-se de um modesto refrator com 26 mm de abertura, mas, com ele a astronomia libertou-se dos limites do olho humano e uma revolução na compreensão do Universo teve início.

Desde os primeiros telescópios astronômicos no século 17 os dois conceitos básicos de telescópio, o refrator e o refletor, caminharam juntos. Limitações tecnológicas favoreceram um ou outro tipo ao longo do tempo. Só no século 19 é que os grandes telescópios de pesquisa foram desenvolvidos. Essa foi a época dos primeiros grandes refletores. O maior deles, o chamado Leviatã de Parsonstown, foi construído na Irlanda em 1845 por Lord Rosse e tinha 1,8 metro de diâmetro. Era um instrumento de grande porte, mas complexo, de operação totalmente manual, muito difícil e com severas limitações para apontamento. Raramente foi utilizado.

Ainda durante o século 19 as montagens de telescópio evoluíram bastante e os instrumentos refratores tiveram seu apogeu já que eram mais rígidos e simples de montar que os refletores. Era finalmente possível ter um telescópio que apontava com facilidade para qualquer direção no céu, e, com o uso de um motor, foi possível compensar a rotação da Terra e acompanhar um corpo celeste por horas a fio. Os motores, no princípio, eram acionados por pesos ou por corda como nos relógios.



12- Refrator de 40 polegadas (102 cm) do observatório Yerkes (crédito: Yerkes Observatory).

Posteriormente, o motor elétrico resolveu esse desafio. O maior refrator construído, no observatório Yerkes, tem 102 cm de abertura, com distância focal de 19,4 metros.

A construção do grande refrator de Yerkes representou o limite superior para a tecnologia de construção dos telescópios refratores. Sua grande lente objetiva (na verdade um par acromático de lentes) de 102 cm de diâmetro é muito espessa para evitar deformações produzidas pela gravidade, de modo que apenas uma fração pequena da luz incidente passa através dela.

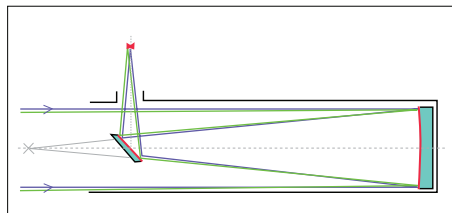
Isso evidenciou que os telescópios profissionais de maior diâmetro seriam refletores. No caso desses modelos, apenas um dos lados do sistema coletor de luz, um espelho côncavo, necessita ser polido. As lentes, ao contrário, requerem polimento de alta precisão em ambas as faces. Além disso, o espelho pode ficar apoiado por toda a sua face inferior, o que minimiza a deformação por ação da gravidade enquanto que as lentes devem ser apoiadas apenas pelas bordas, o que distorce as imagens.

Existem diferentes projetos de telescópios refletores. Conforme sua utilização, um telescópio com dada abertura pode ter o caminho óptico da luz em seu interior maior ou menor, o que refletirá em distintas luminosidades ou magnificações das imagens.

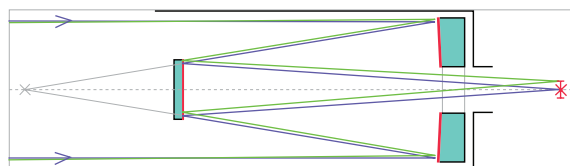
O telescópio newtoniano é o mais simples dos refratores. Esse modelo tem um espelho primário paraboloide e um secundário plano que desvia a luz para fora do tubo, onde está uma ocular. Neste projeto, a ocular fica próxima do extremo superior do tubo, ponto pouco prático para colocar instrumentos pesados. Os telescópios dobsonianos, muito populares entre os astrônomos amadores, são uma variação dos newtonianos.

Na óptica Cassegrain os raios de luz fazem um percurso duplo no tubo: refletem no espelho primário, um paraboloide, são desviadas para um secundário, com forma hiperboloide e então passam por um orifício no centro do primário, fazendo foco abaixo desse subsistema. Essa óptica torna o instrumento bastante compacto. A quase totalidade dos telescópios profissionais usa uma variação do Cassegrain chamada óptica Ritchey-Chrétien, onde os espelhos primário e secundário são hiperboloides, pois esse projeto minimiza as aberrações ópticas. Nesse tipo de telescópio os equipamentos de detecção são colocados abaixo do espelho primário, no eixo óptico do telescópio.

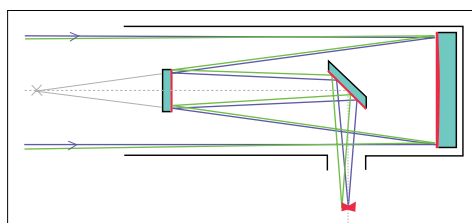
Telescópios com foco Nasmyth, com foco Coudé, têm projeto similar ao Cassegrain, mas contam com um terceiro espelho que desvia o feixe de luz do eixo óptico do telescópio. Esses modelos nor-



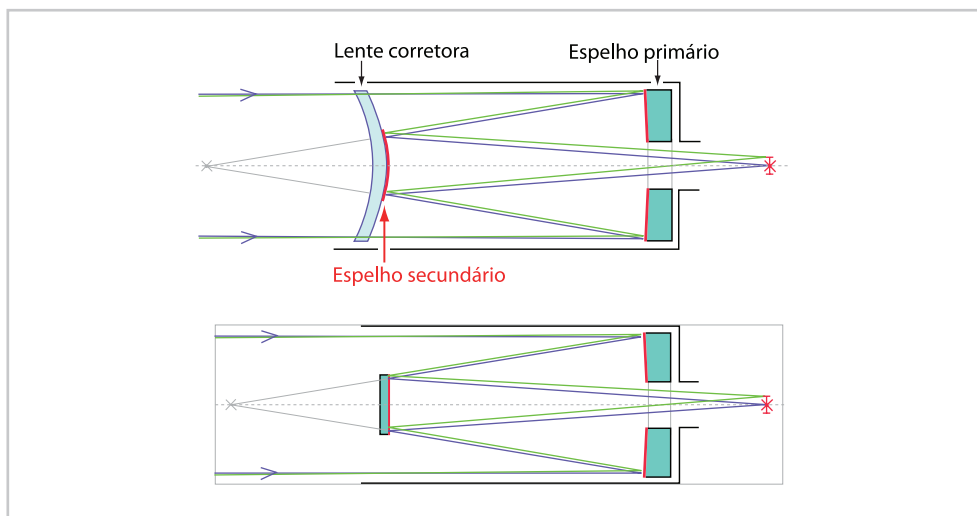
13- Refletor newtoniano (crédito: Wikimedia Commons).



14- Refletor Cassegrain (crédito: Wikimedia Commons).



15- Refletor Nasmyth (crédito: Wikimedia Commons).



16- Os dois projetos de telescópios catadióptricos mais populares. A imagem superior demonstra o esquema de um telescópio Schmidt-Cassegrain e a inferior o de um telescópio Maksutov-Cassegrain. Em ambos os casos o espelho secundário está junto à face inferior da lente corretora de campo.



17- Duas montagens altazimutais. Em ambas, o movimento do telescópio se dá num eixo horizontal (de azimute) e num eixo vertical (de altura). O telescópio da esquerda é acionado por motores elétricos controlados por computador e o da direita é totalmente manual (crédito: Celestron).



18- Montagem equatorial motorizada (crédito: Celestron).

malmente são utilizados em grandes telescópios que usam equipamentos de detecção pesados e não podem ser montados no próprio tubo, como grandes espectrógrafos.

Os telescópios catadióptricos combinam características dos refletores e dos refratores simultaneamente. São instrumentos nos quais a luz é coletada por um espelho primário como nos refletores, mas o tubo óptico é fechado e na sua entrada uma lente corretora de campo permite corrigir aberrações ópticas da imagem. Esse conceito permite projetar instrumentos com grande distância focal, mantendo o tubo compacto.

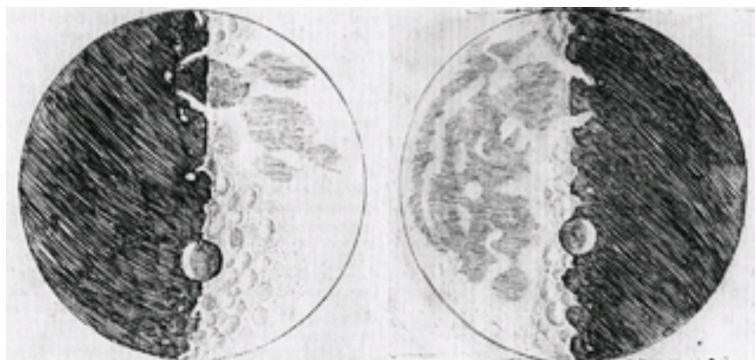
Para se observar um astro por um longo período é necessário que a rotação da Terra seja compensada. Isso é feito com emprego de um motor ou de um conjunto de motores que move o tubo do telescópio, mantendo o alvo sempre na mira. Assim, um ponto crítico no projeto ou na aquisição de um telescópio é a decisão sobre a montagem do equipamento, o que vai definir como o acompanhamento sideral é feito.

Existem duas montagens básicas de telescópio: a equatorial e a altazimutal. Em ambos os casos, o telescópio é montado sobre dois eixos ortogonais que permitem apontá-lo para qualquer direção no céu e, com o acionamento de motores, compensar a rotação da Terra. A montagem altazimutal é conceitualmente mais simples: o telescópio se move num plano horizontal, chamado plano azimutal, e num plano ortogonal a esse, chamado plano de altitude ou de elevação. Nesse caso a compensação da rotação da Terra requer o movimento de dois motores simultaneamente, um em cada eixo, que devem funcionar com velocidades diferentes e variáveis ao longo de uma sessão de observação.

Na montagem equatorial, um dos eixos do telescópio é alinhado com o eixo de rotação da Terra. Ainda que esse alinhamento possa ser razoavelmente trabalhoso para telescópios portáteis, torna o acompanhamento sideral muito mais simples, pois basta que o telescópio se mova num único eixo, alinhado com o eixo de rotação da Terra, para compensar o giro do planeta. Mais ainda, esse acompanhamento é feito por um motor de velocidade constante e igual para qualquer alvo ou horário de observação.

Até o fim dos anos 1980, os telescópios profissionais eram construídos em montagem equatorial, já que nesse caso um motor girando a velocidade constante e bem controlada pode compensar com eficiência a rotação da Terra. Mas a montagem equatorial é assimétrica, o que traz uma dificuldade

19- Desenho feito por Galileu que reproduz as observações feitas com o primeiro telescópio astronômico. Nesse esboço ele mostra o relevo e as fases da Lua.



séria: a necessidade de alinhar um dos eixos do telescópio com o eixo da Terra faz com que a montagem seja volumosa, complexa, pesada e cara de construir. A partir do início dos anos 1990, com a popularização e com o rápido progresso da informática, foi possível projetar e construir os grandes telescópios com montagem altazimutal, pois processadores cada vez mais rápidos e baratos passaram a permitir o controle em tempo real de motores de velocidades variável em dois eixos. Atualmente todos os grandes telescópios profissionais são construídos com montagem altazimutal, o que faz os projetos do telescópio e de seu prédio mais compactos e baratos.

2.3.3 DETECTORES DE LUZ: DAS PRIMEIRAS CÂMERAS AOS CCDs

Ao longo de milênios, o olho humano foi o único detector de luz usado em observações astronômicas. Grandes astrônomos da Antiguidade, como Hiparco de Niceia, fizeram descobertas notáveis sem auxílio de instrumentos ópticos; eles usavam apenas miras e instrumentos de medidas de ângulos como quadrantes ou sextantes.

A partir do início do século 17 o telescópio astronômico tomou forma graças à engenhosidade de Galileu, que adaptou para observações astronômicas um instrumento que já existia para fins militares ou comerciais como a observação de navios ou de soldados à distância. Mas mesmo com o auxílio de telescópios o problema-chave do registro das observações continuava em aberto: se um astrônomo descobrisse algo interessante no céu, era obrigado a desenhar sua descoberta em papel para relatá-la a seus pares. A questão do registro das observações é fundamental já que apenas por uma imagem de qualidade é que uma descoberta pode ser verificada pela comunidade científica, para ser comprovada ou refutada.

Como detector da radiação luminosa, a performance do olho humano é admirável: em termos da eficiência na detecção da radiação incidente, a eficiência quântica, o olho humano é bem mais eficiente que os filmes fotográficos que por mais de um século foram os detectores mais utilizados pela ciência em geral. A eficiência quântica é uma medida da fração da radiação incidente que efetivamente é registrada por um detector: enquanto um filme fotográfico tem eficiência quântica de 2-3%, o olho humano chega a 10%. Outra característica importante do olho é sua sensibilidade espectral: o olho humano é mais eficiente no amarelo, região espectral em que o Sol emite mais energia, revelando as-



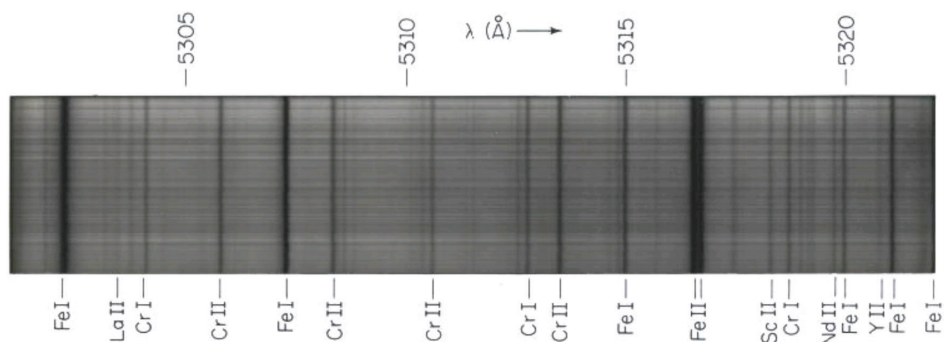
20- Primeira foto da Lua, feita em 1851 por John Adams Whipple usando a técnica chamada daguerreotipo.

sim o resultado de bilhões de anos de evolução: o olho humano é mais sensível na faixa espectral onde existe mais energia disponível. Outra característica do olho importante para observações astronômicas é sua adaptabilidade à escuridão. O olho é mais sensível em ambientes de baixa luminosidade.

Até meados do século 19 todas as observações astronômicas eram registradas apenas com o olho do observador, que a seguir deveria se valer de suas habilidades gráficas e desenhar o que havia observado pela ocular do telescópio. Essa é uma limitação dramática pela razão simples de que o olho humano não dispõe de ajuste do tempo de exposição! A pupila funciona como um diafragma de câmera fotográfica e pode ficar mais aberta em ambientes de baixa luminosidade ou mais fechada em ambientes muito iluminados, mas a taxa com que a informação é transmitida ao cérebro não se altera. Com qualquer câmera fotográfica, por mais rudimentar que seja, é possível ajustar o tempo de exposição de modo a aumentá-lo para permitir o registro de objetos mais fracos.

A invenção da câmera fotográfica permitiu o registro fiel das observações astronômicas. A fotografia, baseada no princípio de reações químicas que ocorrem numa chapa colocada no plano focal de uma câmera para registrar uma imagem, foi desenvolvida nas primeiras décadas do século 19. Diversas pessoas participaram dessa empreitada, às vezes colaborando entre si, ou concorrendo umas com as outras. Joseph Nicéphore Niépce foi um desses pioneiros: em 1822 ele conseguiu registrar imagens numa superfície tratada quimicamente. Atribui-se a seu colaborador, o pintor e inventor Louis Daguerre, a primeira foto astronômica. Em 1840 Daguerre fez uma imagem da Lua usando um pequeno telescópio. Lamentavelmente, essa imagem não sobreviveu para a história. A primeira fotografia astronômica remanescente é uma imagem da Lua obtida John Adams Whipple, fotógrafo americano. Em colaboração com o astrônomo William Cranch Bond, ele fez, na mesma época, também a primeira imagem de uma estrela, Vega, a mais brilhante da constelação da Lira.

A partir de meados do século 19 a fotografia consolidou-se como a técnica fundamental para o registro de observações astronômicas. Ela permitiu o desenvolvimento da fotometria, a análise rigorosa do fluxo de luz proveniente de qualquer alvo observado no céu como estrelas ou objetos difusos como nebulosas ou galáxias. O emprego de técnicas fotométricas, principalmente quando aliadas a telescópios mais modernos, a partir do início do século 20, permitiu avanços significativos na astronomia. Em 1925, por exemplo, o astrônomo norte-americano Edwin P. Hubble (1899-1953) demonstrou, usando medidas fotométricas precisas, que a chamada “nebulosa de Andrômeda” é uma



21- Trecho do espectro do Sol com diversas linhas de absorção de íons presentes na atmosfera solar (crédito: E. C. Olson, Mt. Wilson Observatory).

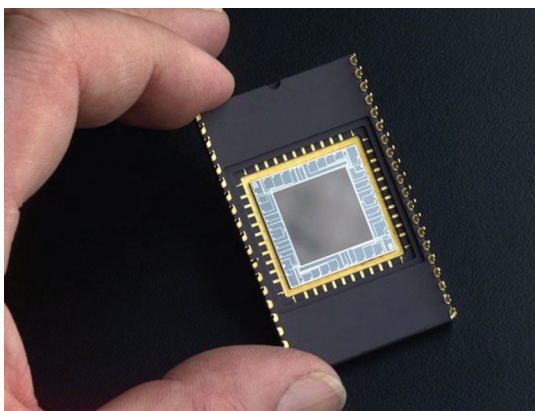
galáxia tão grande ou maior que a Via Láctea, a galáxia que abriga o Sistema Solar, o que alterou profundamente a concepção do Universo.

A fotografia passou a ser empregada não só no registro de imagens, mas também na espectroscopia. Utilizada no plano focal da saída do espectrógrafo por tempos de exposição que podiam ser de muitas horas ou mesmo de algumas noites sucessivas, uma câmera fotográfica registrava o espectro do corpo celeste em observação. Os resultados desse procedimento abriram janelas novas na compreensão dos processos físicos que ocorrem nos corpos celestes como o estudo de abundâncias químicas das estrelas, a medida de velocidades radiais estelares, galáxias ou a investigação de atmosferas estelares.

Após mais de um século reinando sozinha como instrumento de registro de imagens astronômicas, a fotografia viu surgirem em meados do século 20 os dispositivos eletrônicos como opção para o registro de imagens. Esses dispositivos resultaram do rápido desenvolvimento da eletrônica durante a Segunda Guerra Mundial. Inicialmente surgiram os chamados “tubos de imagem” baseados no princípio da varredura eletrônica. Neste caso a imagem é projetada num plano focal composto de material fotossensível que libera elétrons, que por sua vez são lidos por um processo de varredura. A cada ponto de leitura é lida uma carga elétrica proporcional à intensidade da luz incidente. Esse tipo de dispositivo constrói o análogo eletrônico de uma fotografia clássica onde cada “ponto” da imagem é um grão de material fotossensível que sofre reação fotoquímica com intensidade proporcional à luz incidente.

Em 1948 o transistor foi inventado por John Bardeen, Walter H. Brattain e William B. Shockley. Esse dispositivo serve como “chave” ou como amplificador eletrônico e seu desenvolvimento permitiu a miniaturização e integração dos componentes eletrônicos em escala nunca antes imaginada. Por esse desenvolvimento, seus autores foram reconhecidos com o Prêmio Nobel de Física de 1956.

Em 1969, o Dispositivo de Carga Acoplada (*Charge-Coupled Device* – CCD) foi desenvolvido por Willard Boyle e George E. Smith. Esse dispositivo é um circuito integrado, e portanto “descendente” dos transistores, e funciona como o análogo de um filme fotográfico, com a diferença que, em vez de grãos de um material fotossensível que sofre uma reação fotoquímica, o CCD é uma matriz de fotoelementos. Quando colocado no plano focal de uma câmera, cada elemento do CCD, denominado pixel, acumula uma carga elétrica proporcional à luz incidente, produzindo-se assim uma imagem eletrônica. Por essa conquista com notável impacto em diversas áreas da ciência e da tecnologia modernas, Boyle e Smith receberam o Prêmio Nobel de Física de 2009.



22- O retângulo central mais claro em um CCD contém os fotoelementos ou pixels, a montagem mais escura abriga os circuitos eletrônicos e no verso estão os conectores elétricos. Colocado no plano focal de um telescópio e dado um tempo de exposição apropriado, o CCD permite obter imagens de objetos milhões de vezes mais fracos que os visíveis a olho nu (crédito: Smithsonian Astrophysical Observatory).



23- Modelo do mosaico de 189 CCDs que equipará a câmera de 3.200 mega-pixels do LSST, cujo plano focal terá 64 cm de lado. A imagem da Lua mostra qual será a escala do plano focal do telescópio (crédito: LSST Corporation).

A partir dos anos 1980, os CCDs começaram a ser largamente empregados em astronomia, substituindo os filmes fotográficos como elemento de registro de imagens. Isso ocorreu porque os CCDs têm inúmeras vantagens sobre os filmes: são mais sensíveis, têm eficiência quântica maior e operam em faixas dinâmicas mais amplas. Além disso, imagens eletrônicas podem ser analisadas, impressas, armazenadas, transmitidas e exibidas usando exclusivamente meios digitais, dispensando processamento químico.

A partir de meados dos anos 1990 as câmeras fotográficas digitais popularizaram-se e a produção de CCDs explodiu, bem como a dos CMOS, seus similares. Agora, câmeras relativamente baratas, e mesmo telefones celulares, têm detectores digitais com performances que até recentemente estavam restritas a equipamentos profissionais de alto custo.

Atualmente, mosaicos compostos por vários detectores CCDs estão em desenvolvimento para equipar novos telescópios. O projeto LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*) é um exemplo disso. Trata-se de um telescópio de 8,4 metros de diâmetro em construção nos Andes chilenos e, quando estiver concluído, em 2015, fará um levantamento fotográfico de todo o céu visível daquele local ao final de poucas noites. Esse telescópio será equipado com a maior câmera CCD do mundo: um mosaico totalizando 3.200 megapixels.

2.3.4 RADIOTELESCÓPIOS

A informação que chega até a Terra proveniente de corpos celestes não se limita à faixa visível do espectro eletromagnético. A faixa das ondas de rádio, por exemplo, começou a ser explorada na astronomia a partir de 1931, quando Karl G. Jansky construiu a primeira antena tipo “prato” com o objetivo inicial de procurar as origens de interferências detectadas em emissões comerciais de radiotelefone. Essa antena pioneira operava na frequência de 20.5 MHz. Com ela foi possível obter pela primeira vez a emissão em rádio do disco da Via Láctea, com intensidade máxima registrada na direção da constelação de Sagitário, onde está o centro da Galáxia. O rápido desenvolvimento da tecnologia de radar durante a Segunda Guerra Mundial foi posteriormente aplicado à radioastronomia, que experimentou um rápido crescimento no pós-guerra.

Comparada com a faixa óptica, a janela das ondas de rádio do espectro eletromagnético é muito



24- Antena de 40 m do Rádio-observatório de Owens Valley, nos Estados Unidos (crédito: Owens Valley Radio Observatory).



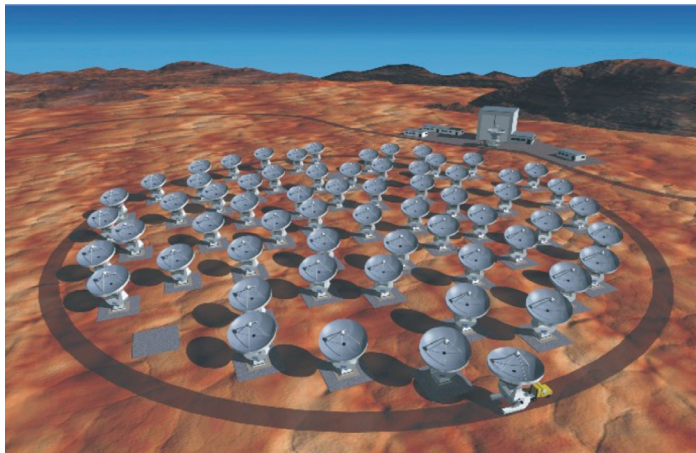
25- Radiointerferômetro VLA (Very Large Array), localizado no Novo México, Estados Unidos (crédito: David Finley - NRAO).

mais larga, estendendo-se das ondas milimétricas, com frequências na faixa dos GHz, até comprimentos de onda de dezenas de metros. Para as regiões espectrais de comprimentos de onda mais longos, entre 3 e 30 metros, que corresponde a frequências de 10 a 100 MHz, são usadas antenas direcionais similares às antenas de televisão comerciais. Já para comprimentos de ondas menores são empregadas antenas tipo “prato”, similares às parabólicas comerciais, mas com diâmetros muito maiores, podendo chegar a uma centena de metros.

Uma técnica extremamente poderosa usada em radioastronomia é a chamada radiointerferometria. Esse recurso consiste em captar sinais de uma mesma fonte astronômica por um conjunto de antenas, normalmente algumas dezenas, espalhadas num arranjo pré-estabelecido que pode ser unidimensional, ou em forma de “Y” ou ainda num arranjo mais complexo. O sinal de cada uma das antenas é transportado por cabos coaxiais ou fibras ópticas até um centro de análise onde são superpostos, ou seja, combinados levando-se em conta suas intensidades e fases.

Esse tipo de medida permite aumentar a intensidade do sinal medido, mas sua importância fundamental é que através de uma técnica denominada “síntese de abertura” permite reconstruir a imagem da fonte que está sendo observada com imensa resolução angular. Essa técnica permite resultados equivalentes em resolução angular a um telescópio virtual cujo diâmetro corresponde à separação entre as antenas mais distantes do conjunto e permite visualizar detalhes da ordem de milésimos de segundo de arco.

Um dos mais ambiciosos projetos de radiotelescópios atualmente em desenvolvimento é o ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*), em construção no norte do Chile, em um dos sítios mais elevados e secos de todo o mundo, o Planalto de Chajnantor, a 5.200 m acima do nível do mar no altiplano andino. O ALMA pertence a um consórcio de vários países e é formado por um conjunto de 66 radiotelescópios, cada um deles com 12 m de diâmetro, operam na faixa das ondas milimétricas, mas atuando como interferômetro. Os sinais individuais das antenas serão correlacionados de forma a que o conjunto todo opere como se fosse um único radiotelescópio gigante. Com a conclusão prevista para 2013, o ALMA será o maior e mais sensível radiointerferômetro do mundo e suas antenas individuais poderão ser posicionadas em distintos arranjos, conforme a exigência de cada pesquisa.



26- Concepção artística do projeto ALMA, visto aqui em sua configuração compacta. Nas configurações estendidas as antenas podem se afastar muito mais umas das outras, chegando até a 16 km de extensão em seu eixo maior (crédito: ALMA/European Southern Observatory).



27- Foto do Telescópio Espacial Hubble feita pela tripulação do Space Shuttle Atlantis em maio de 2009, durante a quinta e última missão de reparo (crédito: NASA).

2.3.5 TELESCÓPIOS NO ESPAÇO

Desde o início dos lançamentos de satélites artificiais no final dos anos 1950, ficou claro que uma nova janela de observação se abria para a astronomia. Sem a interferência da atmosfera da Terra é possível observar faixas do espectro eletromagnético às quais a atmosfera é opaca, como as regiões do ultravioleta, dos raios X, dos raios gama ou das ondas de rádio milimétricas. Além disso, mesmo nas faixas em que a atmosfera é transparente, como a região visível, observações acima da atmosfera não sofrem os efeitos de turbulência, emissão ou absorção de radiação.

O primeiro observatório espacial foi o satélite Ariel 1, da Grã-Bretanha, lançado em 1962 e destinado a medir emissões de raios X e ultravioleta solares. Daí em diante, dezenas de satélites destinados a observações astronômicas foram projetados e lançados. Ao longo das últimas décadas diversos satélites se tornaram muito conhecidos dentro da comunidade astronômica. O satélite IUE (*International Ultraviolet Explorer*), destinado a investigar a região ultravioleta do espectro, entre 120 e 320 nanômetros, operou de 1978 a 1995 e, a partir de seus resultados, milhares de artigos científicos foram publicados. Outro satélite importante foi o IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*), que operou apenas no ano de 1983. Com ele foi feito o primeiro levantamento de todo o céu na faixa do infravermelho, entre 12 e 100 μm .

Um dos telescópios espaciais mais conhecidos é o *Hubble Space Telescope*, lançado pela Nasa em 1990, que é um dos equipamentos astronômicos com maior produção de resultados científicos. Com a missão de serviço executada em 2009 espera-se que o Hubble mantenha-se ativo até a entrada em operação do Telescópio Espacial James Webb, previsto para ser lançado no final desta década.

Atualmente diversos observatórios espaciais estão em operação e outros tantos em fase de projeto. Um dos mais instigantes é o satélite Gaia, que deverá operar entre 2013 e 2018. Ele vai determinar posições e distâncias de estrelas com precisão até milhares de anos-luz do sol. Esses resultados permitirão que se obtenha pela primeira vez uma visão tridimensional da Galáxia, resultado essencial para o progresso de diversas áreas da astronomia pois possibilitará a calibração de diversos parâmetros básicos usados em distintas áreas da astronomia.



28- Vista aérea de Stonehenge, observatório megalítico construído na Inglaterra entre os anos 2400 e 2200 a.C.. A orientação das pedras permite a determinação das datas dos solstícios e equinócios (crédito: University of California – Irvine).



29- Templo-observatório de Chichén Itzá, em Yucatan, sul do México, construído pelos maias ao redor do ano 1000 d.C. (crédito: Wikimedia Commons).



30- Radiobservatório de Arecibo, em Porto Rico, o maior radiotelescópio de prato único do mundo, com 306 m de diâmetro (crédito: Wikimedia Commons).

2.3.6 OBSERVATÓRIOS ASTRONÔMICOS

Observatórios astronômicos são bases de operação em que são instalados conjuntos de telescópios. Ruínas de diversos observatórios astronômicos muito antigos ainda podem ser encontradas no mundo. Inicialmente destinados a observações do Sol para fins de definição das estações do ano, os observatórios mais antigos têm milhares de anos. Stonehenge, na Inglaterra, é um dos mais velhos; tão antigo quanto as pirâmides do Egito. Outros observatórios históricos podem ser encontrados em lugares como Chichén Itzá no México, Chankillo no Peru, Newgrange na Irlanda ou Rujm-el-Hiri em Israel.

Observatórios têm um conjunto de pontos em comum: por razões óbvias, ficam afastados de fonte de luz artificiais como cidades, rodovias ou parques industriais. Devido aos altos custos de construção de estradas e instalações técnicas de apoio, normalmente um observatório reúne diversos telescópios no mesmo sítio, ou em sítios próximos.

Mas uma distinção básica deve ser feita entre radiobservatórios e observatórios ópticos: observações astronômicas na faixa das ondas de rádio não requerem instalações de montanha como ocorre com observatórios ópticos. Ao contrário, normalmente os radiobservatórios são instalados em vales ou planícies, em locais tão isolados quanto possível de emissões de rádio artificiais. A instalação em fundo de vales reforça o isolamento de emissões geradas por rádio e televisão comerciais, telefonia e radares.

Devido aos efeitos produzidos pela atmosfera da Terra sobre as imagens astronômicas, observatórios ópticos são instalados em montanhas, de preferência no mínimo a dois mil metros acima do nível do mar. Além disso, os locais preferidos são aqueles com baixa umidade do ar, portanto com baixos índices de chuva ao longo do ano. Reunindo todos estes critérios, poucos são os locais considerados ideais para observatórios astronômicos, e por isto mesmo muitos deles estão próximos uns dos outros. O caso mais evidente é o norte do Chile, nas bordas do Deserto de Atacama, um dos lugares mais secos do mundo, situado na pré-cordilheira andina, onde montanhas de dois mil metros ou mais são comuns. Nessa região estão instalados alguns dos mais modernos telescópios do mundo, em diversos observatórios. Estão instalados nesta região há décadas o Observatório Interamericano de Cerro Tololo (CTIO), o Observatório Europeu Austral (ESO) e o Observatório de Las Campa-



31- Vista aérea do Observatório Interamericano de Cerro Tololo (crédito: NOAO).



32- Os quatro telescópios de 8 m de diâmetro que compõem o Very Large Telescope (VLT) do ESO, localizados no topo do Cerro Paranal, no Chile (crédito: ESO).



33- Observatório do Monte Mauna Kea, no Havaí. Entre os mais importantes telescópios pode-se ver em primeiro plano o telescópio Canadá-França-Havaí de 3,6m, um pouco à esquerda está o domo prateado do telescópio Gemini Norte, de 8 m de diâmetro. Na direita ao fundo os domos gêmeos dos telescópios Keck, com 10m de diâmetro cada, e mais distante o domo cilíndrico escuro do telescópio Subaru, de 8,2 m (crédito: NOAO).

nas. Posteriormente chegaram, nessa região, o Observatório do Cerro Paranal, operado pelo ESO, os telescópios do Cerro Pachón, uma extensão do CTIO, e o observatório milimétrico ALMA.

Ilhas oceânicas também são locais privilegiados para a instalação de telescópios astronômicos, pois sem as massas de terra continentais o fluxo do ar é menos turbulento, melhorando a qualidade das imagens. Entre os observatórios instalados em ilhas destaca-se o Observatório de Mauna Kea, no Havaí. Sua elevação, 4.200 metros acima do nível do mar, torna esse observatório um dos mais importantes do mundo, pois nesta altitude é possível fazer-se observações na faixa do infravermelho, impossíveis a partir do nível do mar.

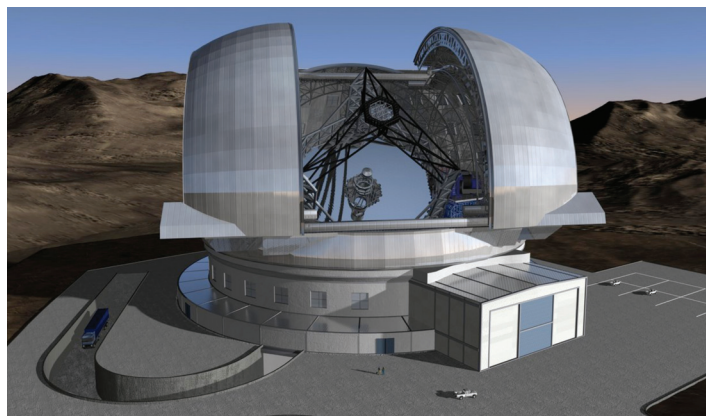
Outro importante observatório instalado numa ilha é o de Roque de Los Muchachos, na ilha de La Palma, arquipélago das Ilhas Canárias, território espanhol. Nele estão alguns dos mais importantes telescópios construídos por países europeus, entre eles o Gran Telescópio de Canárias, com 10,4 metros de diâmetro.

O Brasil, apesar de sua grande extensão territorial, não tem um local ideal para um grande observatório astronômico. E isso pela ausência de altitude mínima de 2000 acima do nível do mar, com ambiente seco. Ainda assim, alguns sítios são razoáveis para esse fim, como ocorre com o Pico dos Dias, no sudeste de Minas Gerais, próximo às cidades de Brasópolis e Itajubá, onde a astronomia brasileira deu um passo fundamental, a partir do final dos anos 1970, com a instalação do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA). Esse foi o primeiro observatório brasileiro capaz de produzir dados científicos nos padrões profissionais modernos. O observatório está equipado com um telescópio de 1,60 m e dois instrumentos de 0,60 m.

Já nos anos 1990, no entanto, ficou evidente que telescópios maiores eram necessários para garantir aos astrônomos brasileiros o acesso continuado a instrumentos competitivos, comparados aos melhores do mundo. Nessa época o Brasil decidiu investir em dois projetos fundamentais: o telescópio SOAR, com 4,2 m de diâmetro, e o par de telescópios Gemini, um deles localizado no Chile e o outro no Havaí, com 8 m de diâmetro cada. O SOAR é um projeto em cujo desenvolvimento e construção muitos astrônomos brasileiros estiveram envolvidos. O telescópio está instalado no Cerro Pachón, no norte do Chile, a mesma montanha onde está instalado o Gemini Sul. Ambos equipamentos são geridos e operados por consórcios de que o Brasil faz parte e astrônomos brasileiros fazem observações em ambos os sítios regularmente.



34- Telescópios Gemini Sul (à frente) e SOAR (ao fundo) localizados no Cerro Pachón, Chile. O Brasil é sócio dos consórcios que operam ambos os telescópios (crédito: SOAR Telescope)



35- Concepção artística do E-ELT, cujo espelho primário será composto por um mosaico de 984 segmentos hexagonais, cada um com 1,45 m de extensão e apenas 5 cm de espessura. O prédio terá cerca de 90 metros de altura e 90 metros de diâmetro (crédito: ESO).

Como serão os telescópios do futuro? Os projetos em desenvolvimento permitem antever como serão os telescópios das próximas décadas: já estão em andamento projetos de construção de telescópios na faixa de 30 a 40 metros de diâmetro que devem ser a vanguarda da astronomia observacional a partir de 2020 aproximadamente.

Vários desses projetos estão consolidados ou em fase final de revisão ou estágio inicial de construção. Entre eles estão o E-ELT (*European Extremely Large Telescope*), um telescópio de 42 metros de diâmetro a ser instalado no Chile que está sendo projetado por um consórcio de países europeus. Outro projeto em fase adiantada é o TMT (*Thirty Meter Telescope*) que como o nome diz se trata de um telescópio de trinta metros de diâmetro projetado e construído por um grupo de instituições de pesquisa dos Estados Unidos e Canadá, que será instalado no Monte Mauna Kea, no Havaí. O GMT (*Giant Magellan Telescope*) será um telescópio composto por sete espelhos de 8,4 metros de diâmetro alinhados num foco comum, com desempenho equivalente ao de um telescópio de 24,5 metros de diâmetro; ele será instalado em Las Campanas, no Chile, e pertence a um grupo de instituições de diversos países, liderados pelos Estados Unidos.

Todos esses telescópios têm o início de suas operações de pesquisa previsto para 2018-2020 aproximadamente e deverão ser os instrumentos mais importantes das próximas décadas para a astronomia observacional na faixa óptica. Mas, o que deverá vir em seguida? Aí só se pode especular: fala-se em telescópios na faixa dos cem metros de diâmetro instalados no lado oculto da Lua, ou então de telescópios no espaço, bem afastados da Terra, com dezenas de metros de diâmetro. Isso para não falar em sistemas interferométricos compostos por grupos de telescópios, cada um também com dezenas de metros de diâmetro, separados por quilômetros entre si e com foco comum. Um sistema assim só poderia funcionar no espaço e teria resolução equivalente ao de um telescópio com diâmetro igual à separação das unidades mais separadas como em qualquer interferômetro, ou seja, quilômetros de diâmetro! O que um instrumento assim poderá fazer desafia a imaginação.



36- Meteorito Allende, que se fragmentou em milhares de pedaços ao cair em Chihuahua, no México, em 1969. Esse objeto celeste contém os minerais mais antigos do Sistema Solar já recuperados, com 4,567 bilhões de anos (crédito: Lawrence Berkeley National Laboratory).

2.4 A INFORMAÇÃO QUE NÃO CHEGA PELA LUZ

Como visto antes, historicamente a astronomia nasceu da observação a olho nu dos corpos celestes. Com o uso de elaboradas miras e quadrantes ou sextantes os astrônomos da Antiguidade conseguiram compilar de catálogos de posição de estrelas e planetas. A determinação de efemérides para o Sol, a Lua e planetas, sem falar de teorias sobre o movimento dos corpos celestes. Mesmo depois da introdução dos telescópios, a partir do século 17, as observações astronômicas limitaram-se à faixa visível do espectro eletromagnético até o início do século 20 quando começaram a ser feitas as observações em ondas de rádio e posteriormente em outras faixas como raios X e gama.

Uma conclusão apressada poderia considerar que toda a informação sobre os corpos celestes que chega até a Terra é obtida exclusivamente pela radiação eletromagnética. Mas isso não é verdade.

Outros portadores de informação chegam até a Terra, caso de meteoritos que relatam a composição química primitiva do Sistema Solar, neutrinos, partículas fundamentais para entender o processo de produção de energia nos interiores estelares, raios cósmicos cuja origem é ainda tema de discussão devido à sua ampla faixa de energias, e mesmo as ondas gravitacionais que, previstas pela teoria da relatividade geral, ainda não foram detectadas. Mas, quando isso ocorrer, trarão informações preciosas sobre a estrutura do espaço-tempo impossível de ser obtidas de outra forma. Além disso, existem também as sondas viajando pelo Sistema Solar que já permitem a coleta de informação fora da Terra.

2.4.1 MATERIAL DO SISTEMA SOLAR: METEORITOS E COLETA LOCAL

Os meteoritos são reconhecidos desde a Antiguidade como objetos extraterrestres. A partir do desenvolvimento da química e das ciências da Terra, como a mineralogia e a geologia, foi possível estabelecer um sistema de classificação para esses corpos de acordo com sua estrutura e composição química (ver capítulo 3). Atualmente coletam-se meteoritos no mundo todo, de preferência em locais onde é fácil localizá-los como em desertos, planícies ou regiões geladas.

Um exemplo interessante neste caso é o meteorito Allende, que caiu no México em 1969. Uma



37- Microfotografia do meteorito ALH 84001, originado de Marte. A estrutura cilíndrica alongada no centro da imagem foi interpretada por alguns especialistas como restos fossilizados de bactérias (crédito: NASA).

análise desse objeto revelou a presença de inclusões de cálcio-alumínio, materiais mais antigos já coletados do Sistema Solar, com idade de 4,567 bilhões de anos.

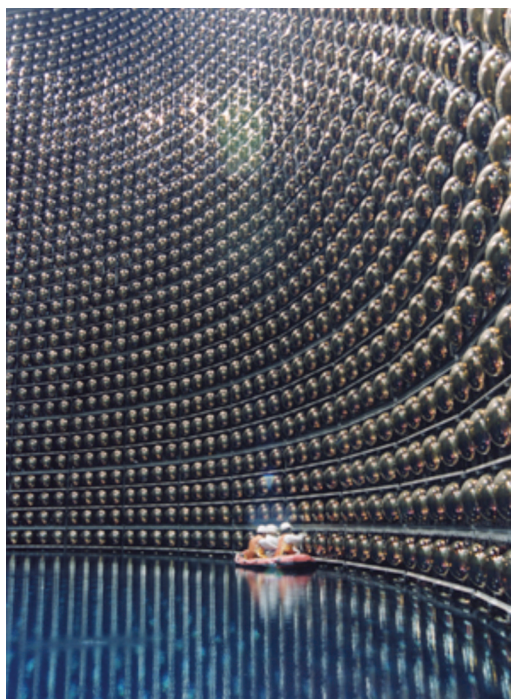
Outro exemplo digno de registro é o meteorito ALH 84001, com apenas 1,93 kg, encontrado na Antártida em 1984. Uma análise desse corpo revelou que se trata de material arrancado da superfície de Marte pelo efeito do impacto de um bólido ainda maior. A descoberta mais fascinante neste meteorito, discutida durante algum tempo, foi que talvez contivesse traços de vida fossilizada. Essa descoberta continua sendo questionada e não é aceita por toda a comunidade científica, mas a perspectiva de que este meteorito seja o portador da informação de que houve vida marciana é instigante.

Os voos de sondas automáticas aos planetas do Sistema Solar, assim como os voos tripulados à Lua, entre 1969 e 1972, proporcionam a coleta direta de material, fonte de informações até então inacessível. Além dos voos tripulados à Lua já foram enviadas sondas que pousaram ou passaram próximos de diversos planetas, de alguns satélites, do próprio Sol e mesmo de cometas. Em alguns casos a análise do material é feita no próprio local de chegada da sonda; foi o caso dos veículos-robôs Spirit e Opportunity, que exploram Marte desde o início de 2004. Outra sonda que fez análises no próprio local de pouso foi o módulo Hyugens, parte da sonda Cassini projetada para explorar Saturno e seu sistema de luas. O módulo pousou em Titã em janeiro de 2005. De modo análogo, a sonda Rosetta coletará material do cometa Churyumov-Gerasimenko em 2014, com perspectiva de pousar no seu núcleo para análises locais.

E existem projetos para coleta de material e transporte para a Terra. Foi o caso da sonda Stardust que passou próximo ao cometa Wild 2 e recolheu material desse astro em 2004; a seguir, essa sonda trouxe material de volta à Terra, onde chegou em janeiro de 2006.

2.4.2 DETECTORES DE NEUTRINOS

Os neutrinos são produzidos em grande quantidade nos núcleos estelares como parte dos processos de nucleossíntese e produção de energia. Além disso, eventos astrofísicos como o colapso de núcleos estelares, o que dá origem a supernovas, produzem imensas quantidades de neutrinos. Assim, a detecção dessas partículas é uma fonte de informação sobre estes processos. Mas detectar neutrinos é uma tarefa extremamente complexa já que essas partículas têm baixíssima interação com a matéria.



38- Técnicos num bote de borracha dentro do detector de neutrinos Super Kamiokande, no Japão. O tanque está localizado a um quilômetro abaixo da superfície, contém 50.000 metros cúbicos de água pura e é internamente rodeado por 11.200 fotodetectores (crédito: Kamioka Observatory).

A probabilidade de interação dos neutrinos com a matéria é tão baixa que as essas partículas, comumente chamadas de “fantasmas”, normalmente atravessam corpos como um planeta como se ele não existisse. Os detectores, na Terra, são baseados na fraquíssima probabilidade de interação dos neutrinos com certos núcleos atômicos: para isso são construídos imensos tanques subterrâneos preenchidos com água ou uma solução de cloro, normalmente instalados centenas de metros da superfície para blindar a influência dos raios cósmicos e de outras fontes de radiação sobre os detectores. Nas raras vezes em que o neutrino interage com um núcleo atômico, ocorre a emissão de um fóton, detectado por um dos fotodetectores do tanque.

2.4.3 DETECTORES DE RAIOS CÓSMICOS

O termo “raios cósmicos” se refere às partículas carregadas que vêm de fora da Terra e colidem com a atmosfera. O termo em si é um equívoco histórico já que não se trata de radiação e sim de matéria. Em termos de composição, 90% dos raios cósmicos são prótons, cerca de 9% são partículas alfa, ou seja, núcleos de hélio, e cerca de 1% são elétrons e partículas mais pesadas. A faixa de energia dos raios cósmicos varia imensamente, por mais de vinte ordens de grandeza, refletindo a diversidade de suas origens. Uma fração grande da radiação cósmica de baixa energia vem do Sol, mas os mais energéticos têm origem controversa, vindo provavelmente de fora da Galáxia. Muito tem sido discutido sobre a influência dos raios cósmicos sobre a Terra, em particular sobre a estrutura da atmosfera, e existem sugestões dentro da comunidade científica de que talvez o clima da Terra seja influenciado por oscilações periódicas da taxa de incidência de raios cósmicos.

A detecção da radiação cósmica depende da faixa de energia dessas partículas: os menos energéticos, mais abundantes, são absorvidos pelas camadas superiores da atmosfera e só podem ser detectados em grande altitude por balões ou satélites. A fração de maior energia colide com os núcleos atômicos de oxigênio e nitrogênio na atmosfera superior e perdem parte de sua energia criando “chuveiros” de partículas secundárias menos energéticas que podem colidir com outros núcleos, todos eles descendo até o solo aproximadamente na mesma direção da partícula primária e formando um cone de partículas que pode ser detectado no solo. O que se detecta no solo são as

39- Um dos detectores de raios cósmicos do Observatório Pierre Auger, na Argentina, com os Andes ao fundo. As informações de cada um dos 1.600 detectores são transmitidas por rádio em tempo real para o escritório central do observatório (crédito: Observatório Pierre Auger).



partículas secundárias produzidas por um raio cósmico primário, e a partir delas é possível inferir a direção e a energia da partícula primária.

A detecção é feita com as mesmas técnicas usadas para identificar partículas elementares em laboratórios como câmaras de bolha ou cintiladores, mas esses equipamentos devem ser espalhados por uma extensa área para medir um chuva produzido por um raio cósmico de alta energia. O Brasil é um dos sócios do maior e mais eficiente sistema de detecção de raios cósmicos de alta energia do hemisfério sul, o Observatório Pierre Auger, localizado no noroeste da Argentina, na província de Mendoza. Ele se compõe de 1.600 tanques cilíndricos de água pura espalhados por uma área de 3.200 km². As partículas secundárias produzidas num chuva desencadeado por um raio cósmico de alta energia são detectadas dentro desses tanques pelo efeito Cherenkov: eles se deslocam com velocidade superior à velocidade da luz no meio e, portanto, emitem fótons que podem ser detectados com fotodetectores instalados dentro de cada tanque.

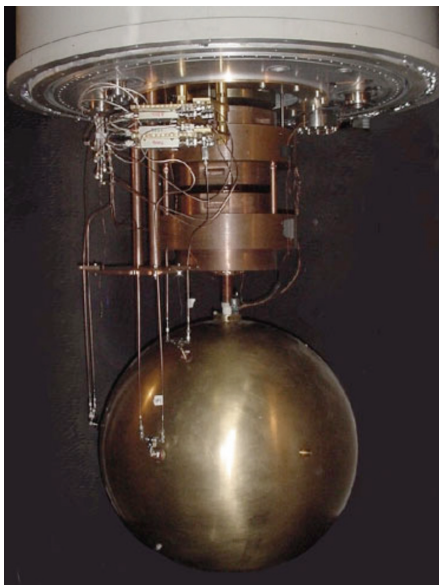
2.4.4 DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

De acordo com a Teoria da Relatividade Geral a gravidade é uma deformação no espaço-tempo produzida pela presença de uma massa. Quando grandes massas como as estrelas se deslocam rapidamente, isso deve gerar uma perturbação gravitacional que se propaga pelo Universo na velocidade da luz. Esse efeito é análogo ao que ocorre quando uma pedra é jogada em um lago e provoca anéis concêntricos que se afastam a partir do ponto em que a pedra mergulhou.

E quando isso ocorre?

Teoricamente diversos objetos astrofísicos geram ondas gravitacionais, como sistemas binários compostos por anãs brancas, estrelas de nêutrons ou buracos negros girando rapidamente em relação a um centro de massa. Ou então o colapso do núcleo de uma estrela que desencadeia uma supernova. As informações trazidas pela radiação gravitacional são de natureza totalmente diferente daquelas transportadas pela radiação eletromagnética, tanto para fins de aplicações astrofísicas como para a validação de teorias fundamentais como a da Relatividade Geral. Daí a importância de sua detecção.

Essas perturbações no espaço-tempo produzem uma radiação gravitacional e diversos esforços tem sido feitos para detectá-la, mas isso esbarra em dificuldades técnicas enormes e os esforços até



40- Detector Mário Schenberg de ondas gravitacionais, instalado no Instituto de Física da USP, em São Paulo, visto aqui sem a cápsula de isolamento térmico que o envolve. A antena é uma esfera maciça de uma liga de cobre (94%) e alumínio (6%) com 65 cm de diâmetro e massa de cerca de uma tonelada (crédito: INPE).

agora não produziram resultados definitivos. Uma onda gravitacional deve gerar uma pequena deformidade mensurável nas dimensões de um corpo de prova, mas essa deformidade é imensamente pequena, o que torna todo o processo de medida muito complexo. Nos casos mais favoráveis espera-se uma deformação linear da ordem de 10^{-18} vezes a dimensão do corpo, o que dá uma ideia da dimensão do efeito de uma onda gravitacional. Isto significa que um corpo de prova da ordem de um quilômetro de extensão, sofrerá uma deformação de $1000 \times 10^{-18} = 10^{-15}$ metros. Em outras palavras, a deformação de um corpo de um quilômetro de extensão pela passagem de uma onda gravitacional é da ordem do diâmetro de um próton: 10^{-15} metros!

Existem no mundo poucos detectores de ondas gravitacionais, todos ainda em fase de refinamento de sensibilidade na expectativa de que, atingindo a precisão suficiente nas medidas, em alguns anos uma onda gravitacional será efetivamente detectada. Entre os detectores pode-se destacar o detector Virgo, na Itália, e o detector LIGO, nos Estados Unidos. Ambos compostos por pares de longos braços ortogonais, da ordem de quilômetros, cuja extensão é medida com imensa precisão pelo uso de interferômetros de laser.

Detecutores análogos no espaço, como o projeto LISA, também estão sendo considerados. Outros tipos de detectores de ondas gravitacionais são grandes massas esféricas resfriadas a temperaturas próximas do zero absoluto e envoltas em sensores de alta sensibilidade. Um detector como este está sendo desenvolvido no Brasil. Trata-se do detector Mário Schenberg, instalado no Instituto de Física da USP e construído numa colaboração entre diversas instituições brasileiras.

CAPÍTULO 3

Movimento aparente do céu

Enos Picazzio

3.1 INTRODUÇÃO

3.2 A ESFERA CELESTE

3.2.1 AS CONSTELAÇÕES

3.2.2 ESTRELAS CIRCUMPOLARES

3.2.3 MEDIDAS ANGULARES

3.2.4 MOVIMENTO DIURNO

- Movimento aparente do Sol
 - Movimento da Lua
 - Fases lunares
 - Eclipses
 - Eclipse solar
 - Eclipse lunar
 - Duração dos eclipses e periodicidade
 - Movimento aparente das estrelas (ou da Esfera Celeste)
 - Calota polar
 - Tempo
 - Dia Sideral, Dia Solar e Dia Solar Médio
- Hora Local, Fuso Horário e Linha Internacional de Data
 - Mês Sinódico e Mês Sideral
 - Ano sideral e ano trópico

3.3 SISTEMAS DE COORDENADAS

- Coordenadas geográficas
 - Coordenadas celestes
- Coordenadas equatoriais
 - Coordenadas horárias
- Coordenadas horizontais
 - Variação de coordenadas
- Tabela das constelações

3.1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo das cidades nos afasta cada vez mais das regiões livres da poluição luminosa. O desenvolvimento, até por questão de segurança, fez com que a iluminação artificial noturna se estendesse por extensas regiões. Com o desenvolvimento vieram as variações do microclima local e a poluição. Nuvens finas ou espessas de vapor de água, contaminadas por partículas sólidas em suspensão, se estendem sobre vastas áreas, espalhando ainda mais a luz artificial noturna. Perdemos gradativamente a visão do céu noturno.

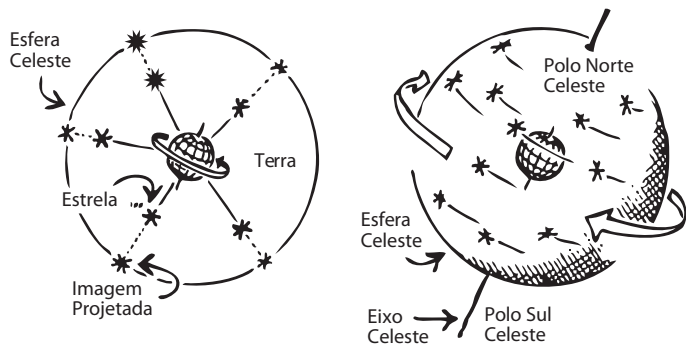
A beleza da noite e o mistério do Cosmo têm inspirado gerações, desde os primórdios da civilização humana. Padrões de beleza e de figuras aterrorizadoras foram associados aos objetos do céu noturno. Por meio deles o homem aprendeu a prever as estações, assim como orientar-se. Os povos antigos enxergavam nas estrelas figuras mitológicas que mantinham a memória de seus heróis e a glória de seus povos.

Quando temos a oportunidade de desfrutar de um céu límpido, mesmo sem auxílio de instrumentos, podemos constatar a beleza do céu noturno. São inúmeros astros de tamanhos e cores diferentes pontilhando o fundo negro como fogueiras distantes. Os objetos mais numerosos são estrelas, de tamanhos, brilhos e cores diferentes. Suas cores vão desde o branco azulado até o avermelhado. O Sol é uma estrela, a “nossa” estrela. Quando ele surge acima do horizonte¹, todas as demais são ofuscadas. Graças a ele a Terra abriga a vida.

Os planetas formam outro grupo de astros, alguns aparentemente grandes e brilhantes (Vênus, Marte, Júpiter, Saturno) quando vistos a olho desarmado, outros imperceptíveis (Urano, Netuno). Como as estrelas, os planetas também exibem cores distintas, mas parecem mais ligeiros.

Circundando os planetas como se fossem membros de uma família, os satélites são corpos ainda menores. Apenas três deles são maiores que Mercúrio, o menor planeta do Sistema Solar. O mais conhecido é a Lua, em parte porque os demais só podem ser vistos com auxílio de instrumentos. Um binóculo já é suficiente para avistarmos os quatro maiores satélites de Júpiter.

1. Horizonte é a linha em que o solo ou o mar parecem unir-se ao céu, e que limita o campo visual de uma pessoa situada em um lugar onde não haja obstáculos à vista.



1- A Esfera Celeste



2- Ilustração das constelações, com destaque à figura de Órion (crédito: Firmamentum Sobiescianum sive Uranographia, Johannes Hevelius, 1690. Domínio público).

Há, ainda, objetos mais exóticos como os cometas e os meteoroides, que produzem rastros luminosos quando penetram a atmosfera terrestre.

A beleza do céu se torna ainda mais exuberante quando dispomos de instrumentação que nos auxilia a enxergá-lo com mais profundidade, isto é, observar objetos com brilhos enfraquecidos. Grandes telescópios nos revelam imagens fantásticas de objetos exóticos, como supernovas, nebulosas e galáxias entre outros dos chamados “animais do zoológico cósmico”.

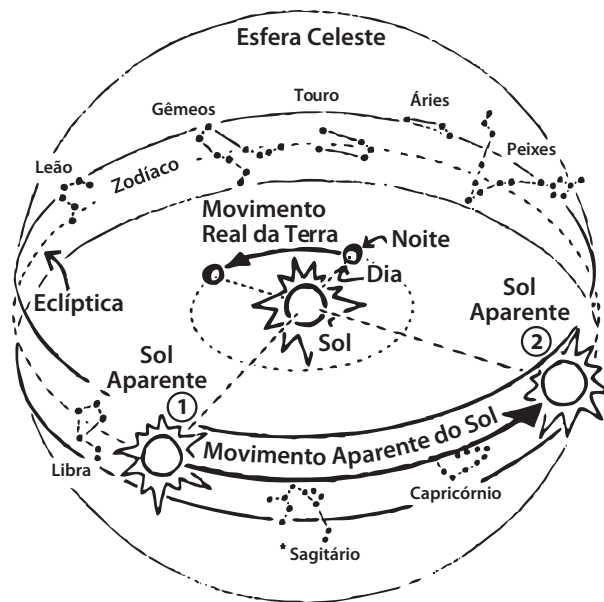
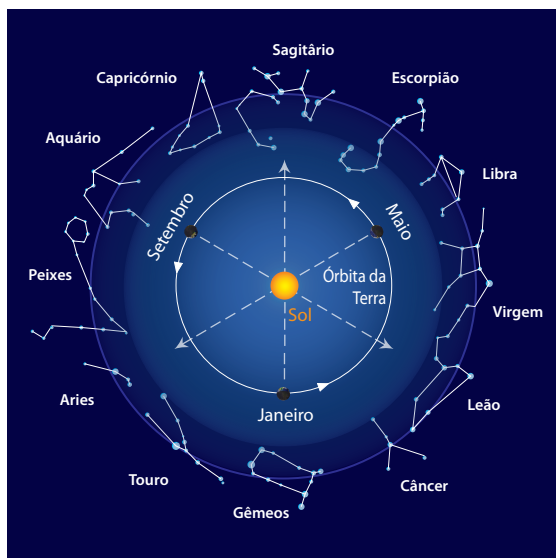
3.2 A ESFERA CELESTE

Esfera celeste é uma abstração que facilita a compreensão dos movimentos aparentes dos astros. Trata-se de uma esfera imaginária centrada na Terra e de raio indefinido. A abóboda celeste que vemos de um lugar qualquer é parte da esfera celeste. Todos os objetos visíveis no céu podem ser então representados como projeções na abóboda celeste (figura 1). Sobre essa superfície podemos, então, traçar linhas imaginárias que permitem determinar as posições dos astros e as distâncias aparentes entre eles, o que significa dizer o quanto estão distantes entre si. Assim, essa é uma visão bidimensional. Se conhecermos as distâncias geocêntricas (em relação à Terra) dos astros, teremos uma percepção tridimensional. Dessa forma, podemos projetar na esfera celeste o polo Norte, o polo Sul e o Equador terrestres, formando respectivamente os polos celestes e o equador celeste.

Para um observador, a esfera celeste gira sobre o mesmo eixo imaginário de rotação da Terra, mas em sentido contrário ao do movimento da Terra. Vista de cima do polo norte geográfico, a Terra gira no sentido “de oeste para leste”. Na superfície terrestre, sentimos a esfera celeste girar em sentido oposto, “de leste para oeste”.

3.2.1 AS CONSTELAÇÕES

A maioria dos objetos celestes visíveis a olho nu, sem auxílio de instrumentos, são estrelas. Aparentemente, as estrelas parecem fixas na esfera celeste, mas isso é mera ilusão, pois elas estão tão distantes



3- Zodíaco (adaptado de D.L.Moché, 1989, Fig. 1.8, p.16).

que seus movimentos são imperceptíveis. Planetas e a Lua, ou satélites como as quatro maiores de Júpiter, são mais raros que estrelas. Lua e Vênus, nesta ordem decrescente, são os astros noturnos mais brilhantes do céu. Embora todos os astros se movam aparentemente no sentido “leste para oeste”, as posições dos planetas e da Lua, relativamente ao fundo estrelado, mudam com o tempo. O movimento aparente mais rápido é o da Lua. Mesmo durante uma noite é possível vê-la deslocar-se ligeiramente para leste. Na realidade ela move-se para leste cerca de 12° /dia. Ou seja, a cada intervalo de 24 horas a Lua desloca-se 12° para leste e nasce um pouco mais tarde.

Por razões que não vamos abordar, as estrelas foram agrupadas em pequenos conjuntos denominados constelações. As constelações estão associadas a figuras geométricas (Triângulo, Cruz etc.), animais (Lobo, Corvo etc.) ou divindades mitológicas (Centauro, Cassiopéia etc.).

A associação entre os astros reunidos em uma constelação é apenas aparente e não leva em consideração a natureza dos objetos, nem as distâncias que os separam. Portanto, os astros localizados em uma determinada constelação pertencem a essa constelação, sejam estrelas da nossa galáxia ou mesmo galáxias inteiras e longínquas. Objetos com movimentos aparentes mais rápidos, como planetas, asteroides e cometas não se mantêm fixos às constelações, mas passam por elas em seus trajetos.

Existem 88 constelações (ver tabela no final do capítulo), o que equivale dizer que o céu foi arbitrariamente dividido em 88 diferentes regiões. Oficialmente, os nomes das constelações são designados em latim e as estrelas componentes são designadas por letras do alfabeto grego, em ordem decrescente de brilho. Assim, α Crux é a estrela mais brilhante da constelação Cruz (Cruzeiro do Sul): ela está no pé da cruz; β Crux, situada no braço esquerdo da cruz, é a segunda estrela mais brilhante, e assim por diante. As estrelas mais brilhantes normalmente têm ainda nomes próprios, caso de Sirius (α CMa, do Cão Maior), a estrela mais brilhante do céu, Betelgeuse (α Ori, de Órion) etc.

Zodíaco é uma palavra proveniente do grego antigo e significa “círculo dos animais”. Zodíaco é a faixa do céu onde estão localizadas as treze constelações mais populares: Carneiro (Áries), Touro (Taurus), Gêmeos (Gemini), Caranguejo (Câncer), Leão (Leo), Virgem (Virgo), Balança (Libra), Escorpião (Scorpius), Sagitário (Sagittarius), Serpentário (Ophiucus), Capricórnio (Capricornus), Aquário (Aquarius) e Peixes (Pisces) (figura 3). É por essa faixa que se deslocam os planetas e



4- Trajetórias das estrelas circumpolares, vista pelo telescópio Gemini, em Mauna Kea, Havaí. Na direção norte, vê-se o polo celeste acima do horizonte (direita), mas na direção sul o polo sul celeste está abaixo do horizonte local (esquerda) [crédito: Gemini Observatory].

aparentemente o Sol. Adotando-se rigorosamente os limites estabelecidos pela União Astronômica Internacional, os planetas ainda passam pelos limites de outras oito constelações: Baleia (Cetus), Corvo (Corvus), Taça (Crater), Monstro Marinho (Hidra), Órion (Caçador), Cavalo Alado (Pegasus), Escudo (Scutum) e Sextante (Sextans).

A quantidade de astros visíveis aumenta na proporção da potência dos instrumentos que utilizamos. Quanto maior o telescópio utilizado, mais luz é captada, logo podemos enxergar objetos mais tênues.

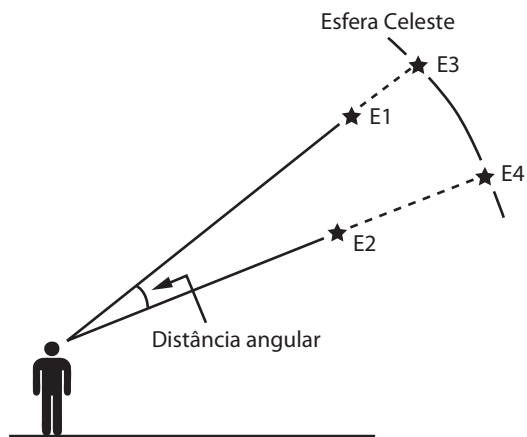
3.2.2 ESTRELAS CIRCUMPOLARES

O céu noturno na direção dos polos celestes revela o movimento circular de estrelas em torno deles. Em uma imagem de longa exposição, esse movimento aparece como traços luminosos, cada um desenhado por uma estrela. O centro desses círculos é o polo celeste. A imagem da figura 4 mostra a posição do polo sul celeste. A altura do polo (em graus) em relação ao horizonte local é a mesma da latitude local. Ou seja, a altura do polo sul celeste vista da cidade de São Paulo é igual a sua latitude, $23,5^\circ$. As estrelas no interior do círculo definido pela altura do polo estão sempre acima do horizonte. Elas são chamadas estrelas circumpolares (circulam os polos). Quanto mais alto o polo estiver no horizonte, maior será a quantidade de estrelas circumpolares. Embora essas estrelas estejam sempre acima do horizonte, são vistas apenas durante a noite.

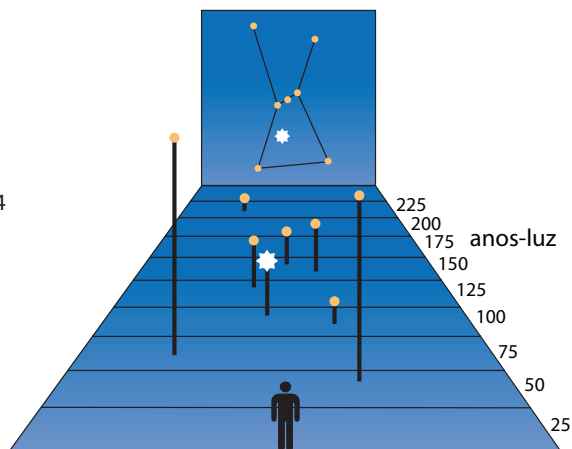
No hemisfério norte, a estrela Ursa Menor está muito próxima do polo, por isso é chamada de Polaris. No hemisfério sul não há uma estrela com essa característica.

3.2.3 MEDIDAS ANGULARES

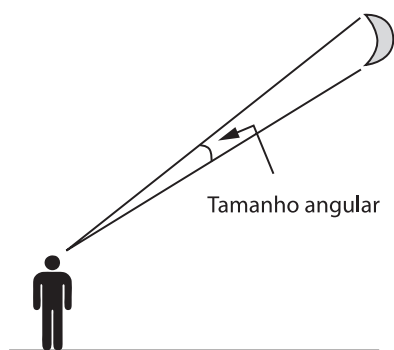
A separação aparente entre os astros na esfera celeste é medida em ângulos, como mostra a figura 5. Imagine que E1 e E2 sejam duas estrelas no espaço. Elas aparecem na esfera celeste nas posições E3 e E4, respectivamente. A distância angular ou aparente entre elas é a separação angular entre E3 e E4. Essa separação é fácil de medir. Já a distância real entre as estrelas, isto é, o valor linear entre E1 e E2, só pode ser avaliada se conhecermos as distâncias dessas duas estrelas à Terra. Por essa razão,



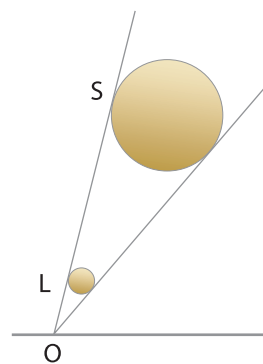
5- Distância angular



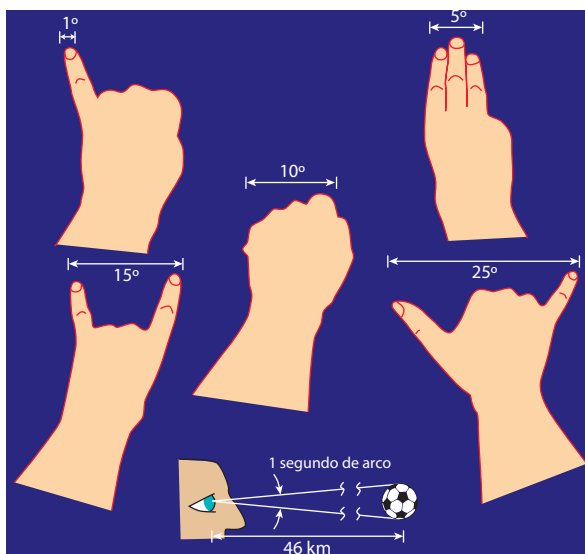
6- Distâncias reais das estrelas da constelação de Órion



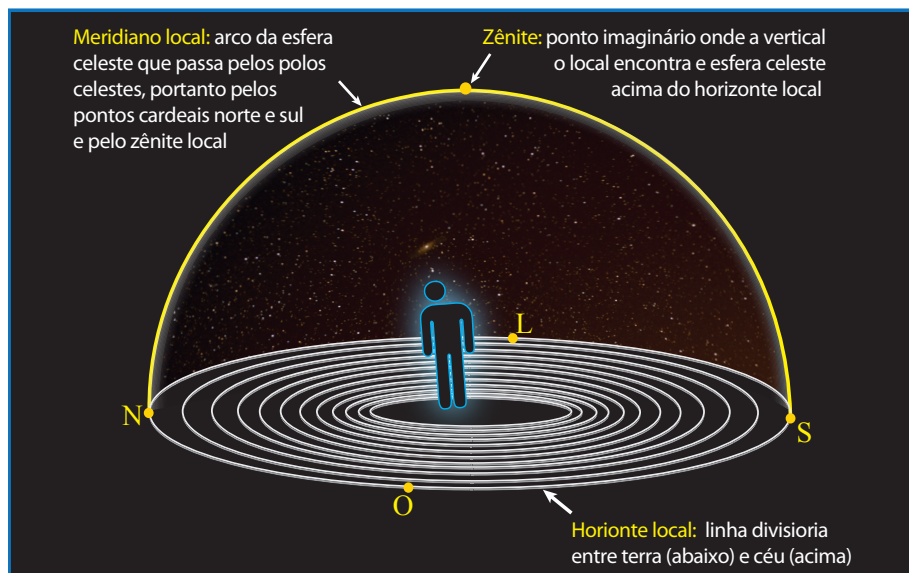
7- Tamanho angular



8- Lua (L) e Sol (S) têm o mesmo tamanho aparente médio para um observador da Terra (O)



9- Valores típicos de medidas angulares usando as mãos, com os braços estendidos



10- Hemisfério visível por um observador

as constelações são definidas por agrupamentos aparentes de estrelas. A figura 6 mostra as distâncias verdadeiras em anos-luz (distância percorrida pela luz durante um ano, equivalente a 9,5 trilhões de quilômetros) das estrelas da constelação de Órion.

Da mesma maneira, pode-se avaliar o tamanho aparente de um objeto (figura 7). A Lua, por exemplo, tem tamanho angular médio de 0,5 grau. O diâmetro real da Lua é bem menor que o do Sol, mas a Lua está muito mais próxima da Terra. Assim, o tamanho aparente médio dos dois astros é o mesmo: meio grau (figura 8).

Uma forma prática de se medir ângulos relativamente pequenos é utilizar as mãos. A figura 9 mostra valores típicos quando utilizamos as mãos com o braço estendido.

3.2.4 MOVIMENTO DIURNO

Na linguagem cotidiana, o termo "dia" pode tanto significar período diurno como intervalo de 24 horas. Na realidade o dia astronômico é composto de um período claro (diurno), um período escuro (noturno) e curtos períodos de transição (crepúsculos). A duração do período diurno não é necessariamente igual ao noturno e ambos variam ao longo do ano de acordo com as estações sazonais.

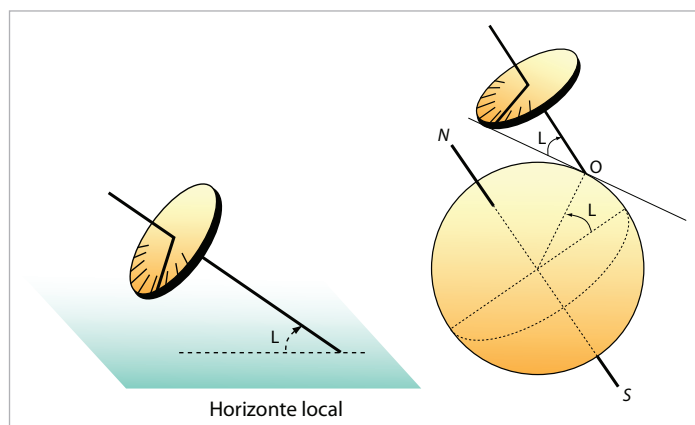
No período diurno, o Sol está acima do horizonte praticamente durante todo o tempo. Além dele, às vezes é possível observar a Lua e/ou Vênus (pouco antes do amanhecer ou ao anoitecer). A luz solar é espalhada na atmosfera e a claridade se faz presente por toda parte.

No período noturno o Sol aparente está abaixo do horizonte e o céu torna-se transparente (não há difusão da luz solar na atmosfera). Durante o período da totalidade (escuridão) de um eclipse total do Sol, os astros se tornam visíveis.

A presença da atmosfera impede a mudança brusca entre os períodos noturno e diurno, e vice-versa. Este fenômeno é conhecido por crepúsculo. Na Lua não há atmosfera, por isso não há crepúsculo.

• Movimento aparente do Sol

Todos os dias o Sol surge acima do horizonte no lado leste, cruza o céu em trajetória na forma de arco, atinge uma altitude máxima ao meio-dia, e põe-se abaixo do horizonte no lado oeste. Isso ocorre em intervalo de aproximadamente 24 horas. Dizemos aproximadamente porque a duração entre



11- Na foto maior vê-se uma réplica de um gnômon indígena, usado como relógio solar, montado em Garopaba, em Santa Catarina por Germano Afonso (Universidade Federal do Paraná). Foto: Lucio Silva/Divulgação). A foto menor mostra um relógio solar feito com um gnômon.

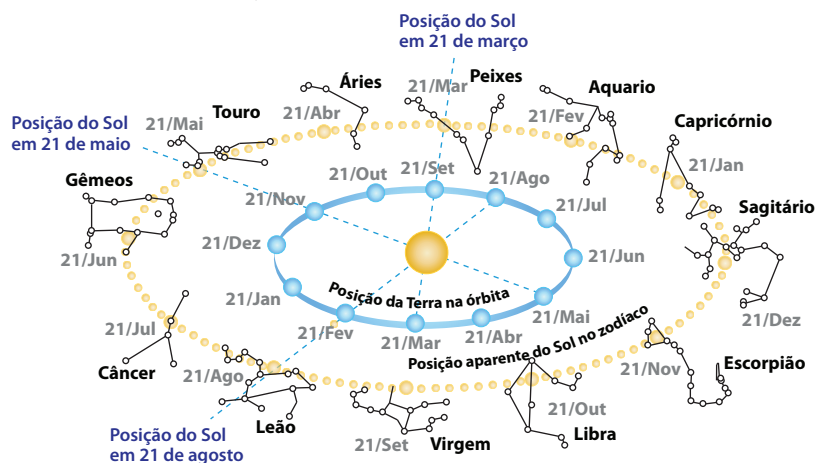
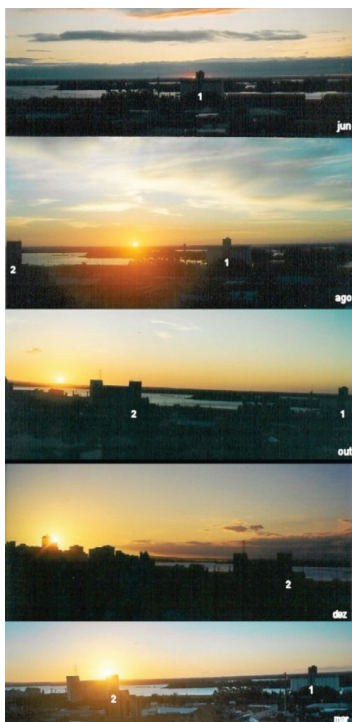
dois meio-dias (ou duas meia-noites) consecutivos não é constante, como explicaremos adiante. O meio-dia local ocorre quando o Sol atinge seu ponto mais alto no céu e isto acontece quando ele cruza o meridiano local (figura 10). Meridiano Local é o arco que liga o norte e o sul geográficos e passa pela vertical do local. Infinitos arcos ligam norte e sul geográficos, mas apenas um deles passa pela vertical local. Essa vertical local encontra a esfera celeste em um ponto chamado zênite. O oposto do zênite é o nadir. O dia definido pelo movimento do Sol é denominado dia solar, que discutiremos em detalhes adiante.

No verão a altura máxima do Sol em relação ao horizonte ocorre na data em que se inicia o verão. No início do inverno, ocorre a altura mínima. Essa altura se mede quando o Sol cruza o meridiano local.

Um dos instrumentos astronômicos mais simples e mais antigo, conhecido por povos de diferentes culturas, para verificar o movimento do Sol durante o dia e ao longo do ano, é o gnômon. Trata-se de uma haste vertical que projeta uma sombra da luz solar (figura 11). Para um dado gnômon, o comprimento da sombra depende da altura do Sol em relação ao horizonte. Quanto mais próximo o Sol estiver do horizonte, mais longa é a sombra projetada. Ao meio-dia, o comprimento da sombra é mínimo.

O ciclo das sombras de um gnômon define, ainda, a segunda unidade básica do tempo: o ano das estações. O comprimento da sombra do meio-dia varia ao longo de um ano, porque a altura do Sol ao meio-dia varia em função das estações do ano. No solstício de verão (por volta de 21 de dezembro) a sombra é mínima porque o Sol atinge sua altura máxima. No solstício de inverno (por volta de 21 de junho) a sombra é máxima, já que o Sol passa pelo meridiano na altura mínima em relação ao horizonte. Entre estas datas ocorrem outras duas em que a sombra intercala-se entre a máxima e a mínima. Essas são as datas do equinócio de primavera (por volta de 21 de setembro) e do equinócio de outono (por volta de 21 de março).

É um equívoco dizer que o Sol sempre nasce no ponto cardinal leste e se põe no ponto cardinal oeste. O Sol nasce no ponto cardinal leste e se põe no ponto cardinal oeste apenas nos equinócios de primavera e de outono. Nesses dias a duração do período diurno e noturno se equivale. Equinócio, do latim *aequinocitium*, significa igualdade dos dias e das noites. Isso só ocorre no momento em que o Sol, em seu movimento anual aparente, cruza o equador celeste. Fora dessas datas, o Sol nasce



cada vez mais a nordeste, após o equinócio de outono, e cada vez mais a sudeste, após o equinócio de primavera. Durante o outono, a cada dia o Sol se desloca em direção ao solstício de inverno. Depois, retorna em direção ao equador, cruza-o na data do equinócio de primavera, desloca-se lentamente em direção ao solstício de verão, quando, então, retorna em direção ao equador novamente. A posição e a hora do nascer e do pôr do sol variam ao longo do ano. A figura 12 ilustra esse deslocamento aparente.

Observadores que estejam próximos aos polos geográficos vivem períodos longos de escuridão no inverno, quando o Sol jamais emerge no horizonte, e de claridade no verão, em que o Sol jamais se põe.

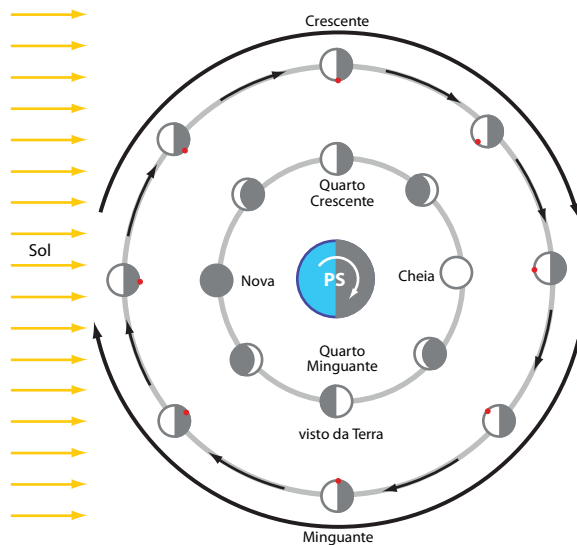
A figura 13 ilustra o deslocamento anual aparente do Sol no zodíaco. O círculo interno representa a posição da Terra em sua trajetória. O círculo externo mostra a posição do Sol, contra as constelações de fundo. No dia 21 de setembro, por exemplo, o Sol está passando pela constelação de Peixes, por isso sabemos que o Sol está na constelação de Virgem. Eclíptica é o nome que se dá à trajetória aparente do Sol. Na realidade ela é a trajetória verdadeira da Terra em torno do Sol.

Movimento da Lua

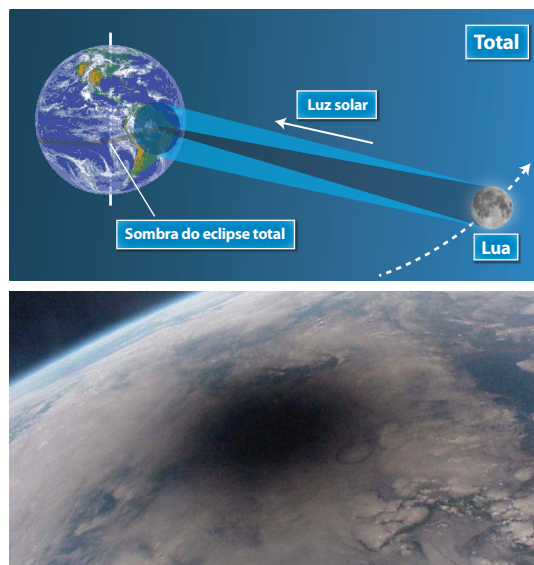
- *Fases lunares*

Desde sempre os humanos têm conhecimento da mudança cíclica do aspecto da Lua. Isso, certamente, foi responsável pela introdução de hábitos noturnos na sociedade humana. Segundo historiadores, foi Aristóteles, de Estagira (384-322 a.C.), quem explicou o motivo dessas diferenças, a que os gregos chamaram fases. Isso ocorre porque a Lua gira em torno da Terra enquanto a Terra gira em torno do Sol, cada um com seu período. Assim, a posição relativa entre Terra, Lua e Sol varia constantemente, por isso a iluminação da Lua aparece sob ângulos diferentes.

A figura 14 ilustra as configurações lunares: a face lunar voltada para a Terra está assinalada com uma marca em vermelho. Quando o disco lunar está praticamente invisível a Lua está na fase nova. Isso significa que a Lua está posicionada na mesma direção aparente do Sol. A lua nova ocorre no período diurno. Essa configuração entre Terra, Lua e Sol é chamada conjunção.



14- Movimento orbital e fases da Lua. Lua Nova (conjunção, 0°), Lua Cheia (oposição, 180°), Quarto Crescente (1ª quadratura, 45°), Quarto Minguante (2ª quadratura, 270°).



15- (topo) Configuração para ocorrência de um eclipse solar. Sol, Lua e Terra devem estar alinhados. (base) Sombra provocada pela Lua durante o eclipse solar de 11/8/1999 (fonte: NASA).

O caso oposto à conjunção é chamado oposição, pois a Lua está na direção oposta à do Sol. Nessa configuração, o disco lunar nos parece completamente iluminado e a fase é lua cheia. Por essa razão a Lua nasce no lado leste no momento em que o Sol se põe no lado oeste. Entre essas fases ocorrem a crescente (de Lua nova para Lua cheia) e a minguante (de Lua cheia para Lua nova). Na fase crescente, a Lua se afasta do Sol, indo para leste. Quando a Lua se afasta 90° do Sol (portanto percorreu um quarto de 360°) atinge a fase quarto crescente. Diz-se que ela está na primeira quadratura. Nessa fase, a Lua aparece no alto do céu quando o Sol se põe. A fase de quarto minguante ocorre quando a Lua afastou-se 270° do Sol, portanto percorreu três quartos de 360° e está a um quarto da fase nova. Nessa fase, a Lua está no alto do céu quando o Sol nasce. Para os habitantes do hemisfério sul, a fase crescente lembra vagamente a forma da letra C, e a minguante lembra a letra D (decrecente).

O ciclo de fases lunares é denominado lunação, período sinódico ou mês sinódico.

• Eclipses

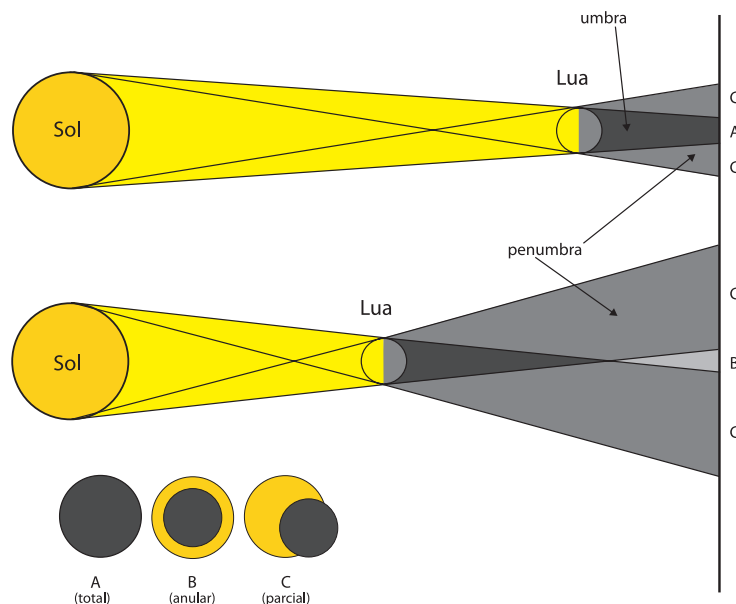
Eclipse é outro fenômeno decorrente de posições relativas entre Sol, Lua e Terra. É um fenômeno mais raro porque é necessário que os três astros estejam praticamente alinhados, portanto próximos de um plano comum, o plano da eclíptica (órbita da Terra). O eclipse pode ser solar ou lunar.

• Eclipse solar

O eclipse solar ocorre quando a Lua encontra-se entre o Sol e a Terra, na fase nova (figura 15). A sombra da Lua projetada sobre a superfície terrestre move-se de oeste para leste a velocidades entre 1.700 e 3.400 km/h.

A sombra é composta de duas partes (figura 16). A parte central, mais escura, é a umbra e pode atingir até 270 km de largura. A parte periférica, bem mais clara, é denominada penumbra. Observadores que se encontram na umbra verão um eclipse total (caso A). Durante a totalidade (período de escuridão) a parte do Sol que permanece visível é a sua atmosfera. Já os observadores que se encontram na penumbra verão um eclipse parcial (caso C), pois parte do disco solar ainda permanecerá visível. Caso o tamanho aparente da Lua seja menor que o do Sol, o eclipse será anular (caso B), pois a parte que restará visível terá o aspecto de anel brilhante. Isso ocorre porque as distâncias Terra-Lua

16- Quando a Lua está mais próxima da Terra parece maior (caso superior). Nesse ocorrem eclipses total e parcial. Quando a Lua está mais distante, parece menor (caso inferior), originando eclipses parcial e anular.



17- Tipos de eclipse solares: (esquerda) total, (centro) parcial e anular (direita).

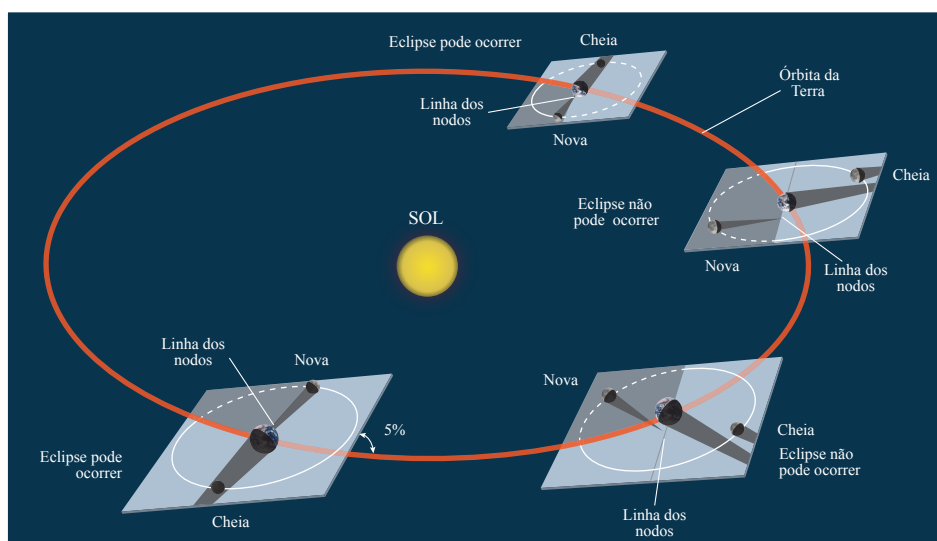
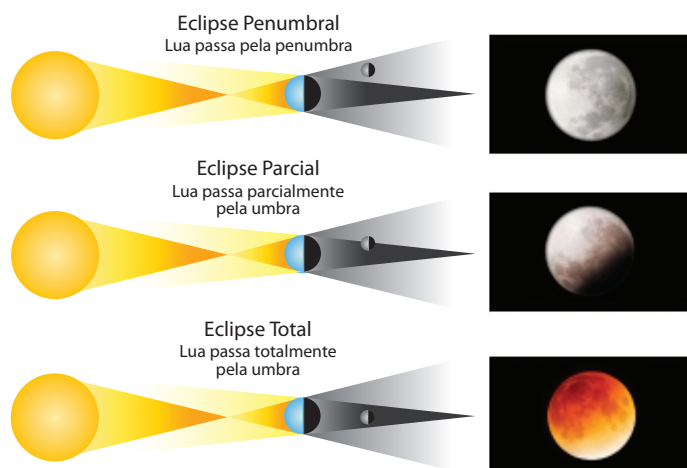
e Terra-Sol variam pelo fato de as órbitas da Terra e da Lua não serem circulares. O disco lunar parece maior quando a Lua está mais próxima da Terra (perigeu), e menor quando está mais distante (apogeu). O mesmo ocorre com o disco solar, quando nosso planeta está no periélio ou no afélio.

• Eclipse lunar

O eclipse lunar ocorre quando a Lua passa pela sombra da Terra. Isso só ocorrerá quando a Lua estiver do lado oposto ao do Sol, próximo à fase de lua cheia. O cone de sombra da Terra também é composto de umbra e penumbra. Quando a Lua passa integralmente pela umbra, ocorre o eclipse lunar total. Se apenas parte da Lua passar pela umbra, o eclipse lunar será parcial. Se a Lua passar apenas pela penumbra, o eclipse será penumbral. Neste caso, o disco lunar aparece ligeiramente escurecido.

Os eclipses ocorrem sempre nas fases lunares cheia (eclipse lunar) e nova (eclipse solar), mas não em todas. A razão disso é que o plano da órbita da Lua está inclinado cerca de 5° em relação ao plano da órbita da Terra (figura19). Portanto, o afastamento da Lua varia entre 5° acima do plano da eclíptica e 5° abaixo. Assim, durante seu trajeto a Lua passa duas vezes pelo plano da órbita da Terra, exatamente nos nodos. Os eclipses só ocorrem quando os três astros estão alinhados, ou seja, praticamente sobre a linha dos nodos.

18- Configurações dos eclipses lunares.



19- O plano da órbita da Lua está inclinado cerca de 5° em relação ao plano da órbita da Terra. A interseção entre os dois planos define uma linha, sobre a qual estão os nodos (cada um dos pontos de intersecção da órbita da Lua com o plano da órbita da Terra).

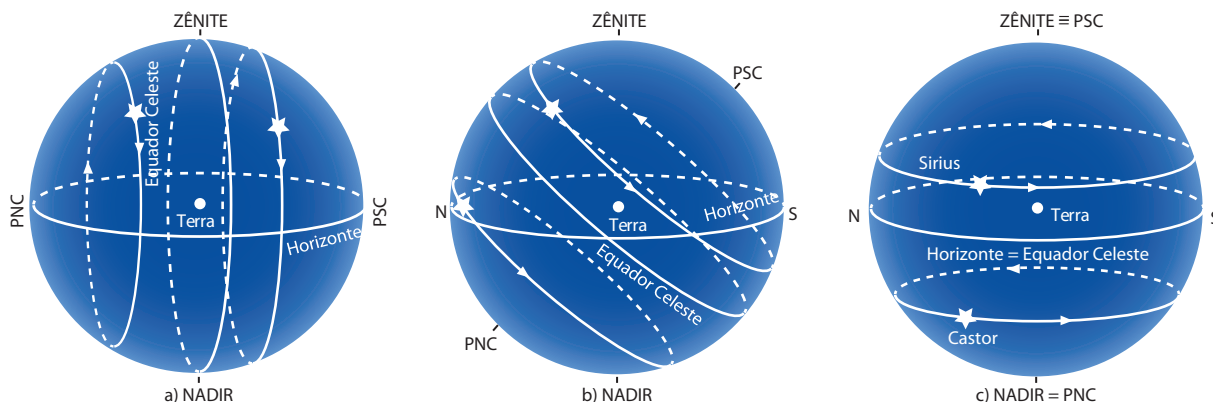
• Duração dos eclipses e periodicidade

Um eclipse solar total jamais ultrapassa 7 minutos e 30 segundos. Já um eclipse lunar total pode durar até 1 hora e 40 minutos.

A cada 18 anos, 10 ou 11 dias (dependendo dos anos bissextos no intervalo) e 8 horas (ou 6585,65 dias) os eclipses ocorrem novamente na mesma ordem, pois Sol, Terra e Lua retornam aproximadamente às mesmas posições relativas. Esse intervalo é denominado ciclo de Saros (palavra de origem grega que significa repetição). Esse fenômeno foi registrado pelos caldeus e era conhecido por Hiparco, Plínio e Ptolomeu. Em cada ciclo ocorrem 70 eclipses, sendo 41 solares e 29 lunares. Em um ano ocorrem de dois a cinco eclipses solares (no máximo, dois totais) e até três lunares. A razão para isso é que a órbita da Lua não é fixa, ela gira gradualmente sobre seu centro em um período de 18,6 anos, também chamado período de regressão dos nodos.

• Movimento aparente das estrelas (ou da esfera celeste)

O movimento aparente das estrelas é o movimento aparente da esfera celeste, que se dá sempre no sentido do leste para o oeste, isto é, elas nascem no lado leste e se põem no oeste. Esse efeito resulta da



20- Movimento aparente visto no equador (A), na latitude 45° sul (B) e nos polos (C) (adaptado de J.B.Kaler, 1994, Fig. 2.16, p.24).

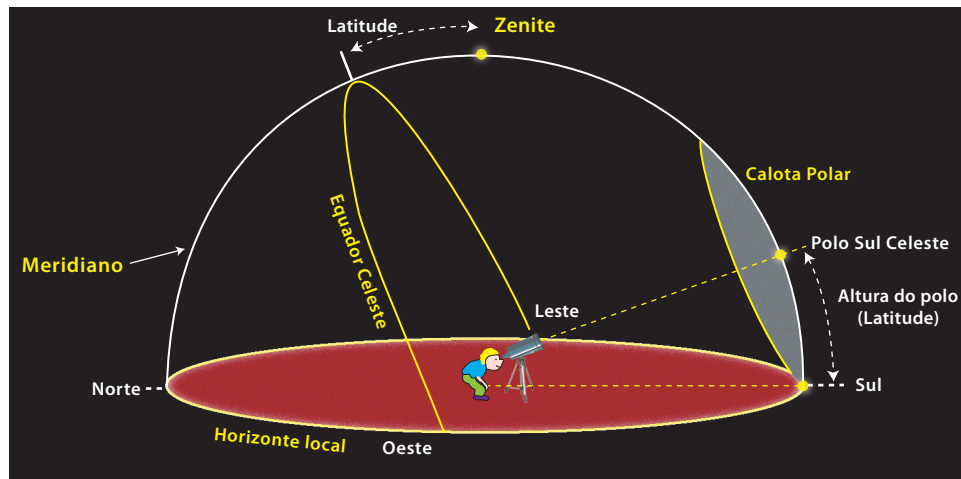
rotação da Terra que gira em seu eixo no sentido oposto, de oeste para leste, quando visto de cima do Polo Norte. Para um observador situado exatamente sobre o equador terrestre (figura 20a) o movimento diurno se dá segundo trajetórias perpendiculares ao horizonte local. Um corpo nascendo exatamente no ponto cardinal leste se porá exatamente no ponto cardinal oeste e passará pelo zênite do observador. Nos demais casos, os arcos continuarão a ser perpendiculares ao horizonte local, mas serão menores à medida que se aproxima dos polos. O observador sobre o equador vê simultaneamente ambos os polos celestes.

Se o observador estiver exatamente sobre um dos polos terrestres, norte ou sul, verá o movimento diurno se processando segundo trajetórias circulares paralelas ao horizonte local. Seu zênite coincide com o polo celeste. As trajetórias maiores serão apresentadas pelos objetos mais próximos do horizonte, e as menores pelos mais próximos do zênite ou do polo celeste (figura 20c). Nesse caso não haverá nascente ou poente porque todos os astros estarão sempre acima do horizonte. Isso pode ser constatado durante os dias escuros do inverno local, já que o Sol estará sempre abaixo do horizonte. Outra particularidade dos polos, é que para um observador situado exatamente sobre um desses polos, não há pontos cardiais. Qualquer que seja a direção de deslocamento desse polo, ela será sempre em direção ao polo oposto.

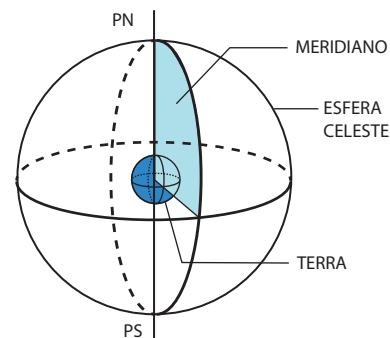
Fora dessas posições particulares, equador ou polos, o movimento diurno se faz segundo arcos inclinados para o sul, se o observador estiver no hemisfério norte, ou para o norte, se o observador estiver no hemisfério sul. Um astro que nasce exatamente no ponto cardinal leste, se põe exatamente no ponto cardinal oeste, mas não passa pelo zênite do observador (figura 20b). É fácil constatar que os arcos do movimento diurno estão inclinados relativamente ao zênite de um ângulo idêntico ao da latitude local.

• Calota circumpolar

Numa noite de céu límpido, e em local bem escuro, um observador voltado para o Sul, com o Leste à esquerda, constata que acima do horizonte local há um ponto imaginário ao redor do qual giram todas as estrelas visíveis. Esse ponto é o polo celeste e sua altura depende da latitude local. A altura do polo define uma calota, cujo diâmetro é o dobro da latitude local. É a calota circumpolar. As estrelas contidas na calota circumpolar nunca se põem abaixo do horizonte, e são chamadas estrelas circumpolares (figura 21). Um observador que esteja no equador vê simultaneamente os polos norte e sul no horizonte. À medida que se desloca na direção de um dos polos esse observador verá um dos



21- O diâmetro angular da calota polar de um local qualquer é igual ao dobro da latitude local. Nela estão as estrelas circumpolares.



22- Meridiano local.

polos cada vez mais alto em relação ao horizonte, conseqüentemente não verá mais o polo oposto, abaixo do horizonte. Quanto maior a latitude, maior a calota. A calota circumpolar não existe para um observador localizado no equador, mas é máxima para observadores nos polos.

• Tempo

As medidas do tempo e os calendários são baseados nos movimentos de rotação e de translação da Terra e no movimento de translação da Lua.

A rotação da Terra em torno do seu eixo é constante e seu período pode ser determinado pela observação. Para isso é preciso definir um plano de referência para o observador. Esse plano, o plano meridiano, é aquele que contém o meridiano local. Portanto, esse plano passa pelo zênite local, pelos polos geográficos e pelos polos celestes.

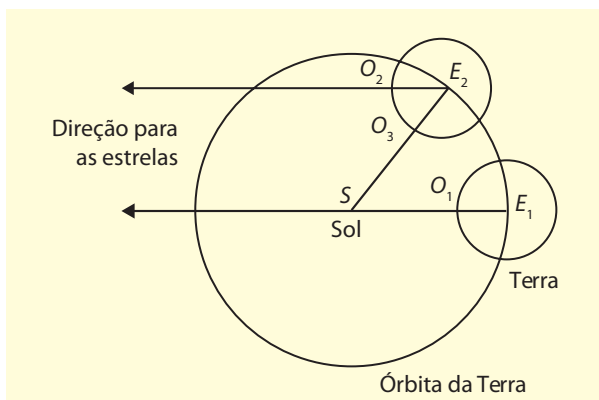
• Dia Sideral, Dia Solar e Dia Solar Médio

A duração do dia astronômico é o período de tempo decorrido entre duas passagens sucessivas de um objeto celeste pelo meridiano local. Se o objeto for o Sol, o dia é chamado solar. Se for uma estrela, que é um ponto de referência muito distante, o dia é chamado sideral.

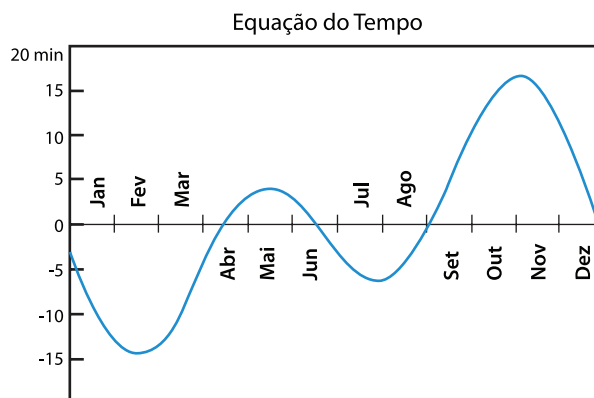
O dia sideral tem duração exata de 23h 56min 04,09s (figura 23). Esse é o período de rotação da Terra. Uma definição mais rigorosa toma como referencial o equinócio de outono (definido adiante).

O dia solar verdadeiro (ou aparente) é o tempo decorrido entre duas passagens sucessivas do Sol pelo meridiano local. A hora solar é marcada pelo relógio de sol. Como a órbita da Terra é elíptica, sua velocidade orbital varia: ela é maior no periélio (maior aproximação do Sol) e menor no afélio (maior afastamento do Sol). Essa variação de velocidade orbital altera a duração do dia solar verdadeiro. Ao longo do ano, o dia solar verdadeiro varia entre 23h e 45min e 24h e 15min. A média anual dos dias solares verdadeiros é chamada dia solar médio, vale 24 horas. A definição mais rigorosa considera o movimento anual aparente do Sol ao longo do equador celeste e da eclíptica.

Portanto, o dia sideral é mais curto que o dia solar médio. A cada dia as estrelas nascem 3min e 55,91s mais cedo, quando observadas em noites consecutivas e nas mesmas condições. Após um ano, os dois instantes (sideral e solar) voltam a se igualar.



23- Dia sideral e dia solar. A Terra percorre 360° em um ano, ou cerca de $0,98^\circ$ por dia. Logo, para o Sol cruzar o meridiano novamente a Terra terá de girar $360,98^\circ$. Ocorre que a velocidade da Terra em torno do Sol não é constante. Perto do Sol ela anda mais rápido (mais de $0,98^\circ$) e longe do Sol ela anda mais devagar (menos de $0,98^\circ$). Isso é que faz a duração do dia solar verdadeiro variar durante o ano.



24- Gráfico mostrando a variação do dia solar verdadeiro relativamente ao dia solar médio, obtido através da equação do tempo.

A diferença entre o dia solar verdadeiro e o dia solar médio é calculada pela equação do tempo:

$$ET = T_m - T_o; \quad (1)$$

T_m e T_o são, respectivamente, tempos solares médio e verdadeiro (figura 24).

• Hora Local, Fuso Horário e Linha Internacional de Data

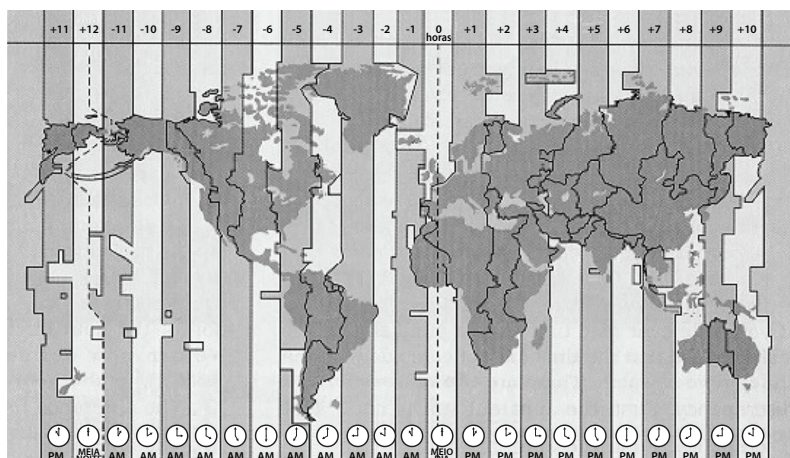
As definições de dia são genéricas, isto é, são válidas para qualquer observador. O que muda é o valor local. Para um dado instante, observadores de diferentes locais verão o Sol em diferentes posições, logo terão horas locais distintas. Interesses políticos e econômicos levaram a utilizar as atividades cotidianas o fuso horário e não a hora local (figura 25). A hora de fuso tem valor próximo ao da hora local.

Ao todo, são 24 fusos de 1 hora e cada fuso equivalente a 15° ($24 \times 15^\circ = 360^\circ$). O fuso de referência para a contagem do tempo e da data é o meridiano do Observatório Real de Greenwich, também chamado meridiano principal (figuras 28 e 29). Os fusos horários são contados à leste (precedidos do sinal -) e à oeste (precedidos do sinal +) dele. Após 1984, a hora média de Greenwich (GMT) foi substituída pelo Tempo Universal Coordenado (UTC), baseado em relógios atômicos (bem mais precisos que o período de rotação da Terra). Zero hora UTC corresponde aproximadamente 24 horas em Greenwich. No caso brasileiro, o fuso do extremo leste é o de Fernando de Noronha (-2 horas), e o de extremo oeste é o do Acre (-5 horas). A maior parte do território brasileiro segue o fuso de Brasília, "-3 horas". Assim, quando for meio-dia em Greenwich (UT=12h), em Fernando de Noronha será 10h; no Acre, 7h; e em São Paulo, 9h.

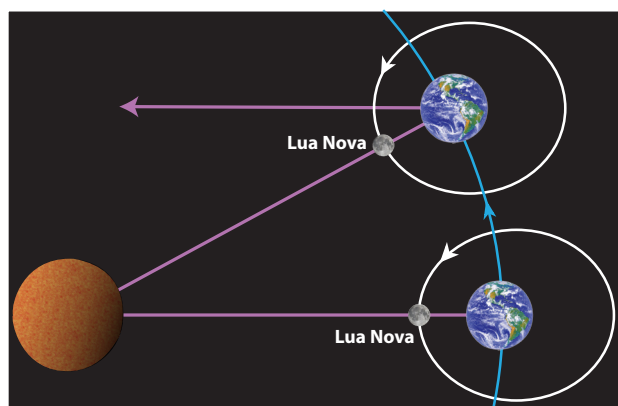
A exatamente 12 horas de Greenwich, está a Linha Internacional da Data (ou Linha de Mudança de Data). Quando essa linha é cruzada em sentido leste-oeste acrescenta-se um dia. Em caso oposto, subtrai-se um dia. Esse efeito era conhecido no passado e utilizado pelos navegadores. As formas dos fusos horários podem ser irregulares devido às fronteiras nacionais dos vários países, ou devido a questões político-econômicas.

Mês Sinódico e Mês Sideral

O mês é determinado pelo movimento da Lua (figura 25). Mês sideral é o período orbital da Lua,



25- Fusos horários e a linha internacional da data. Veja a explicação no texto (adaptado de J.B.Kaler, 1994, Fig. 3.16, p.38).



26- Mês sideral (translação) e mês sinódico (lunação).

com duração de 27,321662 dias (27d 7h 43m 12s). Mês sinódico é o mês das lunações ou das fases da Lua, ou seja, é o tempo decorrido entre duas fases sucessivas (nova-nova, cheia-cheia etc.), e tem duração de 29,530589 dias (29d 12h 44m 3s). Essa diferença ocorre porque durante um mês sideral a Terra avançou cerca de 27° em relação à posição anterior e a repetição da fase lunar esperada só ocorrerá 2,208927 dias mais tarde.

• Ano sideral e ano trópico

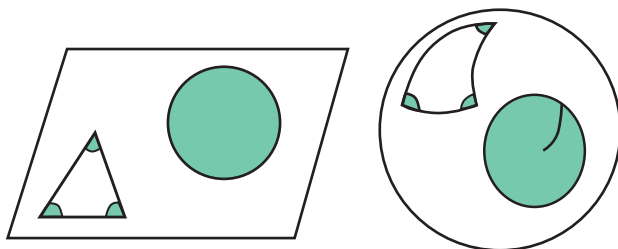
Ano é o tempo decorrido durante uma volta completa da Terra ao redor do Sol. O período de revolução verdadeiro da Terra define o ano sideral, com duração de 365,256363 dias (365d 6h 9m 10s). Já o tempo decorrido entre duas estações sucessivas é chamado ano trópico e dura 365,242191 dias (365d 5h 48m 45s). A rigor ele representa o tempo decorrido entre duas passagens sucessivas do Sol aparente pelo equinócio do outono (definido adiante). A diferença entre os anos sideral e trópico é produzida pela mudança de direção (apontamento) do eixo de rotação da Terra, conhecido por precessão. Essa alteração do apontamento do eixo provoca o deslocamento dos equinócios, também conhecido como precessão dos equinócios.

3.3 SISTEMAS DE COORDENADAS

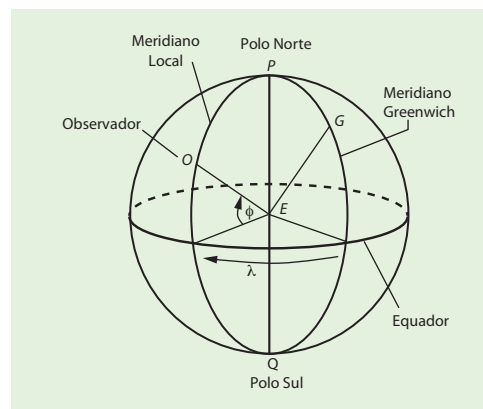
Para especificar uma posição qualquer, seja sobre uma superfície ou mesmo no espaço, é necessária uma referência e uma escala de medida. A referência no caso é um sistema de coordenadas. Em uma superfície plana bastam duas coordenadas. Já no espaço, são necessárias três coordenadas.

Em um ambiente esférico é necessário adotar um sistema de coordenadas angulares porque se mede ângulos. Na superfície terrestre as coordenadas são latitude e longitude. No espaço mede-se a posição dos astros em sistemas semelhantes, mas não idênticos. Em todos os casos, uma das medidas é feita sobre um plano, chamado fundamental. A outra medida é feita sobre outro plano perpendicular ao fundamental.

A seguir vamos tratar dos sistemas de coordenadas mais usuais, começando pelo sistema utilizado para localizar posições na superfície terrestre e expandindo o raciocínio para sistemas de coordenadas astronômicas.



27- Figuras geométricas sobre superfícies plana e esférica.



28- Coordenadas geográficas.

Sobre superfícies esféricas aplica-se a trigonometria esférica (TE). Ela é semelhante à trigonometria cartesiana (TC), feita sobre um plano, mas não é igual (figura 27). Na tabela abaixo, tem-se as diferenças básicas entre ambas.

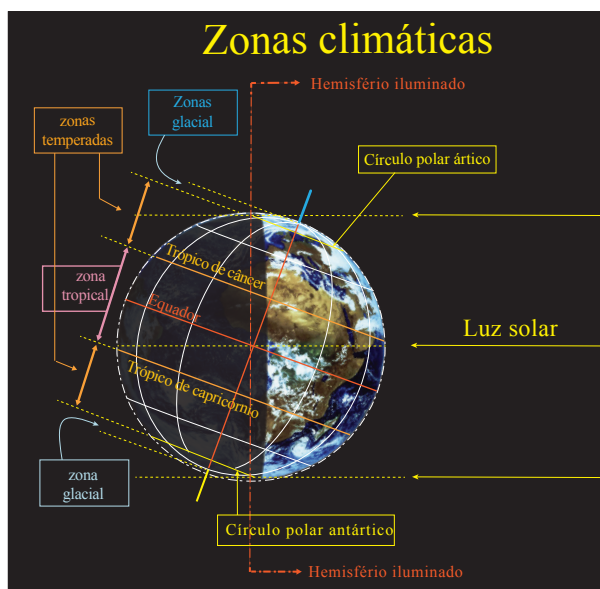
	Soma dos ângulos internos do triângulo	perímetro do círculo	área do círculo
TC	180°	$2 \times \pi \times r$	$\pi \times r^2$
TE	maior que 180°	maior que $2 \times \pi \times r$	maior que $\pi \times r^2$

Para se localizar um ponto sobre uma superfície esférica é necessário criar um sistema de coordenadas, fundamentado em alguns elementos da esfera, como: eixo de simetria (ou de rotação), equador (círculo máximo perpendicular ao eixo de simetria), paralelos (círculos paralelos ao equador), meridianos (círculos sobre planos que contêm o eixo de simetria) e horizontes (planos tangentes à superfície). Vejamos alguns exemplos.

• Coordenadas geográficas

Um observador no mar à distância suficiente para não visualizar o continente tem a impressão que a superfície do mar é plana. Mas, se isso fosse real, o horizonte nos pareceria bem mais distante. Os antigos já haviam reparado que ao se dirigir para o alto-mar a última parte da embarcação a ser avistada era ponta do mastro. Isso era evidência de que a Terra é esférica.

O sistema de coordenadas terrestres utiliza as coordenadas geográficas (figura 28). O eixo (imaginário) de rotação da Terra “perfura” sua superfície em dois pontos denominados polos geográficos: Polo Norte (PN) e Polo Sul (PS), respectivamente nos hemisférios norte e sul. O plano perpendicular ao eixo de rotação terrestre que passa pelo centro da Terra é o plano fundamental, denominado plano do equador. Ao interceptar a superfície terrestre, esse plano define um círculo, o equador, e divide a Terra em dois hemisférios: norte e sul. Da mesma forma, planos paralelos ao plano do equador definem círculos menores denominados paralelos. Os meridianos são círculos na superfície terrestre definidos por planos perpendiculares ao plano do equador e que contêm o eixo de rotação da Terra. É evidente que os meridianos também passam pelos polos geográficos.



29- Círculos polares e Trópicos. Aqui é mostrada a situação em dezembro (verão no hemisfério sul). No círculo polar Ártico a noite dura 24h, e no Antártico o Sol não se põe.

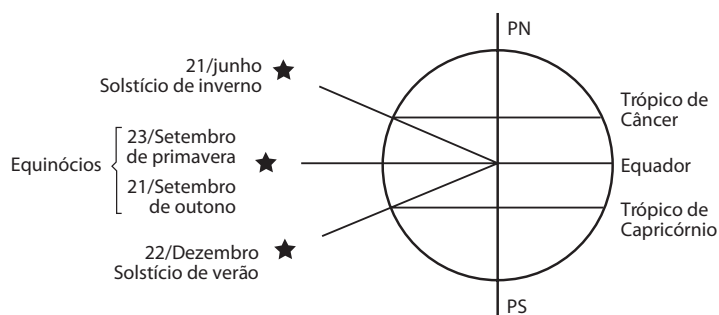
Vê-se, portanto, que qualquer ponto da superfície terrestre pode ser identificado por dois arcos: um sobre o plano do equador e outro sobre o meridiano que passa pelo ponto considerado. O arco medido sobre o equador a partir do meridiano de Greenwich (marco zero) é denominado longitude (λ) e é expresso em grau (e fração). O arco medido sobre o meridiano é chamado latitude (ϕ), expresso em grau (e fração) e varia de 0° (no equador) a $+90^\circ$ (no hemisfério norte) ou a -90° (no hemisfério sul).

As longitudes variam entre 0° e 180° , e são dadas a leste ou a oeste de Greenwich. As coordenadas geográficas aproximadas de São Paulo são: $\phi = -23^\circ 32' 00''$ e $\lambda = 46^\circ 37' 00''$ O; ou seja, estamos a $23,5^\circ$ abaixo do Equador e a $46,6^\circ$ a oeste de Greenwich.

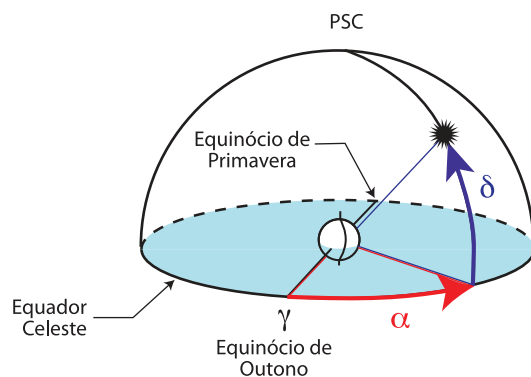
Os círculos polares Ártico (hemisfério norte) e Antártico (hemisfério sul) estão afastados do equador $+66^\circ 33'$ e $-66^\circ 33'$, respectivamente. Os trópicos de Câncer (hemisfério norte) e de Capricórnio (hemisfério sul) estão afastados do equador $+23^\circ 27'$ e $-23^\circ 27'$, respectivamente.

São esses paralelos que definem as três zonas climáticas: zonas glaciais (calotas polares), temperadas e tropical (entre os trópicos). A razão física dessa divisão é a inclinação ($+23^\circ 27'$) do eixo de rotação da Terra, relativamente à eclíptica (órbita da Terra) (figura 30). Observadores posicionados exatamente sobre os trópicos veem Sol passar pelo zênite uma vez por ano (figura 31). Entre os trópicos, os observadores têm o Sol no zênite duas vezes ao ano.

Nas zonas temperadas, isto é, acima do Trópico de Câncer e abaixo do Trópico de Capricórnio, o Sol jamais passa pelo zênite. Quanto mais próximo dos polos estiver um observador, mais baixo verá o Sol ao meio-dia local. Os extremos acontecem nas zonas glaciais, as regiões no interior do Círculo Polar Ártico e do Círculo Polar Antártico. Nelas, durante o verão o Sol permanece sempre acima do horizonte; portanto não nasce nem se põe e o dia será sempre claro. Já no inverno, está sempre abaixo do horizonte e o dia é sempre escuro.



30- Posições do Sol em diferentes épocas do ano. Compare com a figura 29.



31- Coordenadas equatoriais.

• Coordenadas celestes

Consideremos agora não mais a superfície terrestre, mas a superfície da esfera celeste. Para se localizar um objeto nessa superfície, pode-se valer de um sistema de coordenadas semelhante ao geográfico, isto é, baseado em arcos medidos sobre determinados círculos da esfera celeste. Vejamos alguns exemplos.

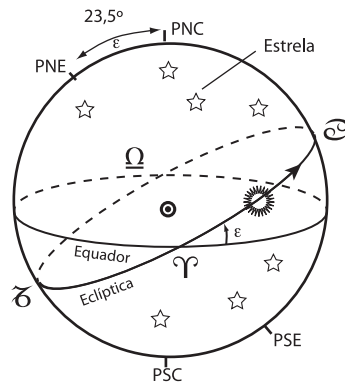
- Coordenadas equatoriais

O sistema de coordenadas celestes mais parecido com o geográfico é o equatorial (figura 32). O plano fundamental nesse sistema é o plano do equador celeste. Com a esfera celeste concêntrica à Terra, o eixo de rotação e o plano do equador são os mesmos nos dois casos. O equador celeste divide a esfera celeste em dois hemisférios (norte e sul, abaixo) e o eixo determina os polos norte e sul. O Polo Norte Celeste (PNC) e Polo Sul Celeste (PSC) são as projeções dos polos geográficos norte e sul sobre a esfera celeste. Já o equador celeste é a extensão do equador terrestre até a superfície da esfera celeste. Os meridianos serão meridianos celestes, e os paralelos de latitude serão paralelos de coordenadas celestes. Embora baseadas no mesmo princípio, as coordenadas não são as mesmas.

O eixo de rotação da Terra não é perpendicular ao plano de sua órbita e está inclinado em $23^\circ 27'$ em relação a essa vertical. Por conta disso, o plano da órbita da Terra também está inclinado em $23^\circ 27'$ em relação ao plano do equador celeste (figura 33). A linha de intersecção entre os dois planos define os nodos (pontos) equinociais na esfera celeste: o equinócio de outono ou primeiro ponto de Áries (posição da Terra em 21 de março) e o equinócio de primavera ou ponto de Libra (posição da Terra em 23 de setembro). Os pontos da eclíptica mais afastados do equador celeste são os solstícios de inverno (posição da Terra em 21 de junho) e de verão (posição da Terra em 22 de dezembro), não considerando, em todos esses casos, os anos bissextos. Para o hemisfério norte, os pontos e as datas são os mesmos, mudam apenas as designações: na ordem em que foram citados acima, serão equinócio de primavera, equinócio de outono, solstício de verão e solstício de inverno. As designações refletem as estações sazonais de cada hemisfério.

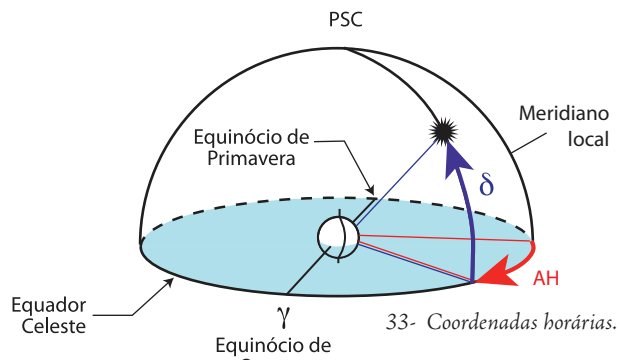
Declinação (δ) é a coordenada celeste medida sobre os meridianos. Da mesma forma que a latitude, ela também varia entre 0° (no equador celeste) e $+90^\circ$ (ao norte do equador) ou -90° (ao sul do equador).

Equinócios: Ω de Primavera; Υ de Outono

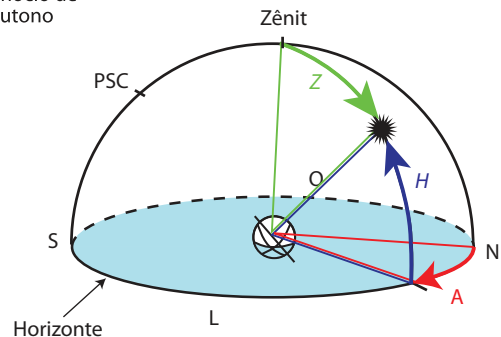


Solstícios: δ de Verão; φ de Inverno

32- Posições da Eclíptica e do Equador na Esfera Celeste.



33- Coordenadas horárias.



34- Coordenadas horizontais.

Sobre o equador é medida a ascensão reta α que varia entre 0h e 24h, e fração. A origem neste caso não é mais o meridiano de Greenwich, mas o equinócio de outono, também denominada ponto γ ou ponto vernal. α é medido em sentido oposto ao do movimento da esfera celeste. Embora a ascensão reta seja medida em ângulo, variando entre 0° a 360° , em astronomia ela é expressa em horas. É fácil verificar que cada hora equivale a 15° ($360^\circ/24h = 15^\circ/h$).

No sistema equatorial, as coordenadas α e δ são universais, isto é, independem do local do observador. Devido à precessão do eixo de rotação da Terra, essas coordenadas necessitam correção.

- Coordenadas horárias

Essas coordenadas provêm de um sistema referencial híbrido, baseado no equador celeste e no meridiano do observador: sistema horário (figura 34). Suas coordenadas são declinação (δ), da forma como definida anteriormente, e ângulo horário (AH), definido como a distância angular entre o meridiano local e o meridiano do astro, medido em hora (e fração), sobre o equador celeste e na direção do oeste (ou no sentido horário, sobre o polo celeste norte).

Enquanto a ascensão reta de um astro é constante, o ângulo horário aumenta com a passagem do tempo. O ângulo horário do ponto γ é chamado tempo sideral (TS). Das figuras 31 e 33 pode-se verificar que:

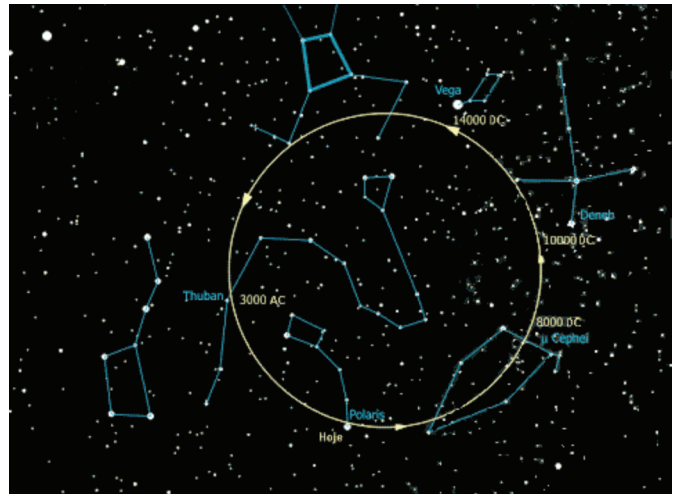
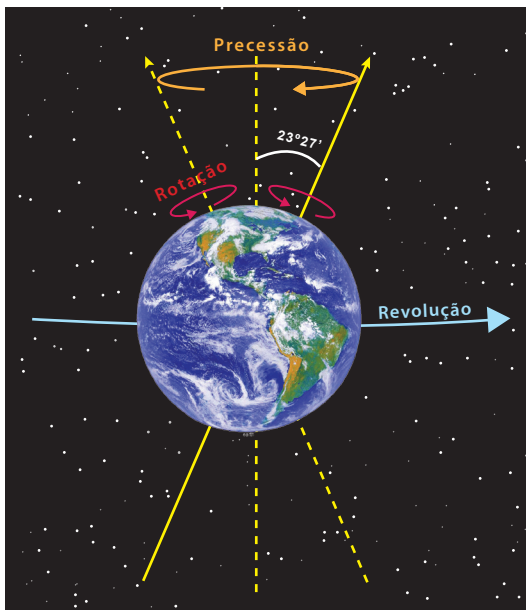
$$TS = h + \alpha \quad (2)$$

O valor de TS não deve superar 24h; quando isto acontecer, subtrai-se 24h.

Por ser um sistema baseado no meridiano local, suas coordenadas horárias variam com a posição do observador.

- Coordenadas horizontais

O sistema horizontal é o mais intuitivo porque é adaptado à calota celeste que o observador considera, isto é, ao hemisfério que está acima do horizonte local. Por essa razão, as coordenadas horizontais de um astro variam conforme a posição do observador (figura 35).



35- A precessão do eixo de rotação terrestre (superior) provoca a mudança de direção dos polos celestes (inferior). Atualmente o polo celeste norte aponta para a direção da estrela Polaris (Ursa Menor), mas já apontou para a estrela Thuban (Dragão) há três mil anos.

Como um observador está no centro do seu hemisfério visível, o eixo de simetria dessa calota passa pelo ponto onde ele está, é perpendicular ao horizonte local, e passa pelo seu zênite.

O ângulo medido em grau sobre o horizonte local, partindo do Norte (origem) e indo na direção do Leste é chamado azimute (A). É fácil constatar que: A (Norte) = 0°, A (Leste) = 90°, A (Sul) = 180° e A (Oeste) = 270°. Portanto, azimute é o ângulo subentendido entre o N e o meridiano que passa pelo astro.

A segunda coordenada é a altura (H), medida em grau a partir do horizonte e em direção ao zênite. Portanto, H varia de 0° (horizonte) a 90° (zênite). Pode-se, também, substituir essa coordenada pelo seu complemento, a distância zenital (z), ou seja: $z = (90^\circ - H)$. z é medido a partir do zênite.

- Variação de coordenadas

O eixo de rotação da Terra não mantém fixa sua orientação no espaço. Embora todos os corpos do Sistema Solar exerçam atração gravitacional sobre a Terra, os efeitos mais significativos são devidos ao Sol (maior massa) e à Lua (maior proximidade). A Terra não é exatamente esférica, mas ligeiramente achatada formando um bojo (saliência) no equador. A ação das forças gravitacionais da Lua e do Sol sobre o bojo provoca a oscilação do eixo de rotação terrestre em torno da normal à eclíptica que passa pelo centro da Terra (figura 36). Esse efeito, conhecido como precessão lunissolar, faz com que o eixo de rotação da Terra descreva um cone no espaço, dando uma volta completa a cada 25.800 anos. Considerando que 1 grau tem 60 minutos de arco e cada minuto de arco tem 60 segundos de arco, conclui-se que 360 graus têm 1.296.000 segundos de arco. Dividindo 25.800 anos por 1.296.000 segundos de arco obtém-se uma variação de aproximadamente 50 segundos de arco por ano. Consequentemente, a linha de interseção do plano do equador terrestre com o plano da eclíptica também precessiona. Com isso, os polos celestes e o equador celeste mudam de posição. Há, ainda, a precessão planetária, decorrente da perturbação gravitacional dos demais planetas, que desestabiliza o plano de órbita da Terra.

Outra oscilação previsível do eixo de rotação terrestre em escalas de tempo (períodos) de 300 anos ou menos é a nutação. Ela decorre, sobretudo, de efeitos secundários de torque gravitacional do Sol e da Lua.

Para correção de todos esses efeitos são utilizadas fórmulas aproximadas, válidas por períodos de aproximadamente duas décadas, geralmente centradas em um ano específico. Em média, as correções são: 3s/ano para ascensão reta (α) e 20"/ano para declinação (δ).

A cada 2.150 anos (25.800/12, as 12 constelações do zodíaco), aproximadamente, as estações começam em constelação zodiacal diferente. Quando oficialmente definido, o ponto γ estava na constelação de Áries, por isso ele é chamado primeiro ponto de Áries; hoje o ponto γ já está entrando na constelação de Peixes.

Tabela com as constelações

Abreviação	Nome latino	Genitivo	Nome português
And	Andromeda	Andromedae	Andrômeda
Ant	Antlia	Antliae	Máquina Pneumática
Aps	Apus	Apodis	Ave do Paraíso
Aqr	Aquarius	Aquarii	Aquário
Aql	Quila	Aquilae	Águia
Ara	Ara	Arae	Altar
Ari	Aries	Arietis	Carneiro
Aur	Auriga	Aurigae	Cocheiro
Boo	Böötes	Böötis	Boeiro
Cae	Caelum	Caeli	Buril
Cam	Camelopardalis	Camelopardalis	Girafa
Cnc	Câncer	Cancri	Câncer, Caranguejo
CVn	Canes Venatici	Canum Venaticorum	Cães de Caça
CMa	Canis Major	Canis Majoris	Cão Maior
Cmi	Canis Minor	Canis Minoris	Cão Menor
Cap	Capricornus	Capricorni	Capricórnio
Car	Carina	Carinae	Carena
Cas	Cassiopeia	Cassiopeiae	Cassiopeia
Cen	Centaurus	Centauri	Centouro
Cep	Cepheus	Cephei	Cefeus
Cet	Cetus	Ceti	Baleia
Cha	Chamaeleon	Chamaeleontis	Camaleão
Cir	Circinus	Circini	Compasso
Col	Columba	Columbae	Pomba
Com	Coma Berenices	Comae Berenices	Cabeleira de Berenice
CrA	Corona Australis	Coronae Australis	Coroa Austral
CrB	Corona Borealis	Coronae Borealis	Coroa Boreal
Crv	Corvus	Corvi	Corvo
Crt	Crater	Crateris	Taça
Cru	Crux	Crucis	Cruzeiro do Sul
Cyg	Cygnus	Cygni	Cisne
Del	Delphinus	Delphini	Delfim
Dor	Dorado	Doradus	Dourado
Dra	Draco	Draconis	Dragão
Que	Equuleus	Equulei	Cavalinho
Eri	Eridanus	Eridani	Eridano
For	Fornax	Fornaeis	Forno
Gem	Gemini	Geminorum	Gêmeos
Gru	Grus	Gruis	Grou
Her	Hercules	Herculis	Hércules
Hor	Horologium	Horologii	Relógio
Hya	Hydra	Hydrae	Hidra
Hyi	Hydrus	Hydri	Hidra Austral
Ind	Indus	Indi	Índio

Lac	Lacerta	Lacertae	Lagarto
Leo	Leo	Leonis	Leão
LMi	Leo Minor	Leonis Minoris	Leão Menor
Lep	Lepus	Leporis	Lebre
Lib	Libra	Librae	Balança
Lup	Lupus	Lupi	Lobo
Lyn	Lynx	Lyncis	Lince
Lyr	Lyra	Lyrae	Lira
Men	Mensa	Mensae	Mesa
Mic	Microscopium	Microscopii	Microscópio
Mon	Monoceros	Monocerotis	Unicórnio
Mus	Musca	Muscae	Mosca
Nor	Norma	Normae	Esquadro
Oct	Ocians	Octantis	Oitante
Oph	Ophiuchus	Ophiuchi	Serpentário
Ori	Orion	Orionis	Orion
Pav	Pavo	Pavonis	Pavão
Peg	Pegasus	Pegasi	Pégaso
Per	Perseus	Persei	Perseu
Phe	Phoenix	Phoenics	Fênix
Pic	Pictor	Pictoris	Caveleto do Pintor
Psc	Piscis	Piscium	Peixes
PsA	Piscis Austrinus	Piscis Austrini	Peixes Austrais
Pup	Puppis	Puppis	Popa
Pyx	Pyxis	Pyxidis	Bússola
Ret	Reticulum	Reticuli	Reticulo
Sge	Sagitta	Sagittae	Seta
Sgr	Sagittarius	Sagittarii	Sagitário
Sco	Scorpius	Scorpii	Escorpião
Scl	Sculptor	Sculptoris	Escultor
Sct	Scutum	Scuti	Escudo
Ser	Serpens	Serpentis	Serpente
Sex	Sextans	Sextantis	Sextante
Tau	Taurus	Tauri	Touro
Tel	Telescopium	Telescopii	Telescópio
Tri	Triangulum	Trianguli	Triângulo
TrA	Triangulum Australe	Trianguli Australis	Triângulo Austral
Tuc	Tucana	Tucanae	Tucano
UMa	Ursa Major	Urae Majoris	Ursa Maior
UMi	Ursa Minor	Ursae Minoris	Ursa Menor
Vel	Vela	Velorum	Vela
Vir	Virgo	Virginis	Virgem
Vol	Volans	Volantis	Peixe Voador
Vul	Vulpecula	Vulpeculae	Raposa

CAPÍTULO 4

A Terra

Enos Picazzio e Eder Cassola Molina

4.1 INTRODUÇÃO

4.2 A FORMA DA TERRA

4.3 O PORTE DA TERRA

4.4 A MASSA DA TERRA

4.5 O INTERIOR DA TERRA

4.6 A SUPERFÍCIE DA TERRA

4.7 TECTÔNICA DE PLACAS

4.7.1 PLACAS E SISMICIDADE

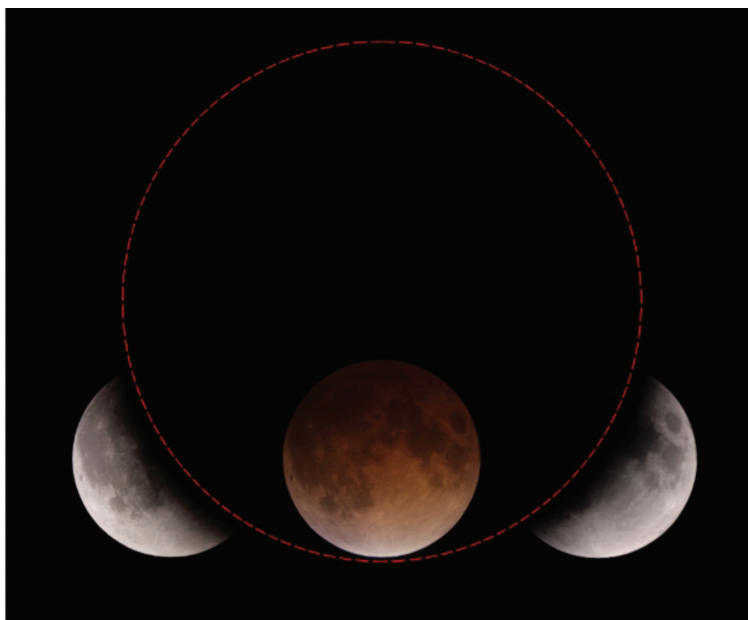
4.8 MAGNETISMO TERRESTRE

4.8.1 MAGNETOSFERA

4.9 ÁGUA: CICLO E AÇÃO GEOLÓGICA

4.10 CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA

4.11 CIRCULAÇÃO E ZONAS CLIMÁTICAS



1- Sombra da Terra durante o eclipse lunar total de 09/11/2003 (Thierry Legault, <http://legault.perso.sfr.fr/eclipse031109.html>, data 21/02/2011).

4.1 INTRODUÇÃO

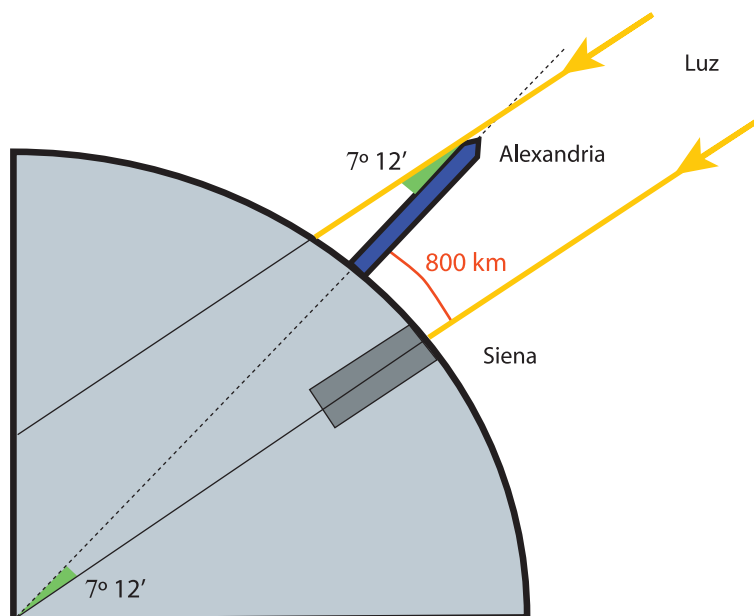
Como os outros planetas do Sistema Solar, a Terra tem seu nome derivado de uma divindade, neste caso Gaia, a mais antiga das deusas, segundo o poeta romano Ovídio (Publius Ovidius Naso, 43 a.C. - 17 d.C.). Na mitologia grega Gaia era a deusa primordial, nascida depois de Caos, o deus primordial. Era mãe de todos os deuses, livre de nascimento ou destruição, de tempo e espaço, de forma ou condição. Ela emergiu do vazio eterno.

A Terra é o terceiro planeta a partir do Sol, e o maior entre os mundos de composição rochosa. É o único planeta conhecido que abriga formas vivas e certamente o único do Sistema Solar a ter forma complexa de vida. Mas isso não é puro acaso. A Terra tem tamanho, composição química, temperatura e condições estáveis adequados à vida. Nem sempre as características terrestres foram favoráveis à vida, sobretudo para os humanos. E, no futuro distante, a Terra não terá condições de manter sua biosfera.

4.2 A FORMA DA TERRA

Da superfície da Terra é difícil distinguir sua forma. Aclives, declives, depressões e montanhas complicam essa percepção. A parte que parece mais plana é a delineada pela água, caso de grandes lagos e oceanos. Ao observarem navios se afastando ou aproximando da praia, os gregos concluíram que a forma da Terra era curva. E isso porque a primeira parte do navio a aparecer ou a última a desaparecer no horizonte era a extremidade do mastro. O fato de as estrelas mergulharem sob o horizonte em horários distintos, quando se deslocam em latitude, também sugeriu, para os antigos, uma forma curva para a Terra.

Aristóteles (384-322 a.C.) apresentou argumentos muito convincentes para a esfericidade da Terra. Observou que, durante os eclipses lunares, o contorno da sombra da Terra projetada na Lua é circular (figura 1). Além disso, notou diferença nos horários de observação de um mesmo eclipse para observadores situados em locais diferentes. Ele se deu conta, ainda, de que o aspecto do céu também muda, conforme a latitude do observador. Todas essas evidências culminavam no formato esférico. Ele chegou a conceber a Terra com forma esférica. Faltava determinar seu tamanho (raio).



2- Supondo a Terra esférica, o ângulo de incidência da luz solar em relação à vertical local varia com a latitude.

Com o desenvolvimento da teoria de gravitação de Newton ficou claro que a distribuição das forças gravitacionais de um corpo de grande massa dá a ele a forma esférica, já que num corpo esférico, todos os pontos na superfície estão à mesma distância do centro, expressando a atuação da gravidade.

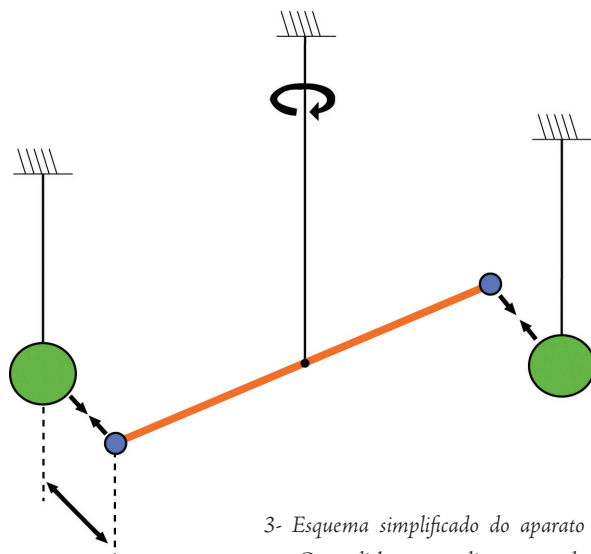
Planetas fluidos, como Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, têm formas menos próximas de uma esfera. A rotação de um planeta quase sempre achata seus polos. Mas planetas rochosos podem ter formas quase perfeitamente esféricas, por conta da resistência do material rochoso. A rotação, evidentemente, achata os polos desses mundos, mas em proporção menor à dos planetas gasosos.

4.3 O PORTE DA TERRA

Levando em consideração as diferenças no aspecto do céu em diferentes latitudes, Aristóteles estimou a circunferência da Terra em cerca de 72 mil quilômetros. Mas, a primeira estimativa mais precisa foi feita por Eratóstenes de Alexandria (276 - 196 a.C.), que nasceu em Cirene, norte da África, mas viveu e morreu em Alexandria. Ele dirigiu a famosa Biblioteca de Alexandria, destruída por um incêndio de razões controversas. Seu experimento até hoje surpreende pela concepção simples e resultado promissor. Eratóstenes argumentava que se a Terra fosse esférica, a incidência dos raios solares em um mesmo instante ocorreria em inclinações que dependiam da latitude. Ou seja, sob a luz solar duas hastes verticais de mesmo tamanho produziriam sombras de tamanhos diferentes se estivessem em latitudes diferentes.

Eratóstenes teve acesso a um relato publicado em um dos livros da Biblioteca de Alexandria. O registro indicava que, ao meio-dia do solstício de verão, podia-se ver o reflexo do Sol em um poço na cidade de Siena (atual Assuã), 800 km ao sul de Alexandria. Isso significava que nessa data o Sol incidia exatamente na vertical. Assim, nesse mesmo instante, ele mediu a sombra de um obelisco em Alexandria. Com a altura do obelisco e o tamanho da sombra calculou o ângulo de incidência da luz em aproximadamente $7,2^\circ$, ou cerca de $1/50$ dos 360° de uma circunferência. Portanto, o comprimento do meridiano terrestre deveria ser 50 vezes maior que a distância entre Alexandria e Siena, ou seja, aproximadamente 40.000 km (figura 2).

Atualmente, as distâncias do centro da Terra a um ponto situado no polo e um situado no



3- Esquema simplificado do aparato utilizado por Cavendish para medir a massa da Terra.

equador são, respectivamente, de 39.940,6 km e 40.075,1 km. Isso implica, respectivamente, em uma distância entre os polos e entre dois pontos opostos no equador de 12.713,5 km e 12.756,3 km (valor médio = 12.735 km).

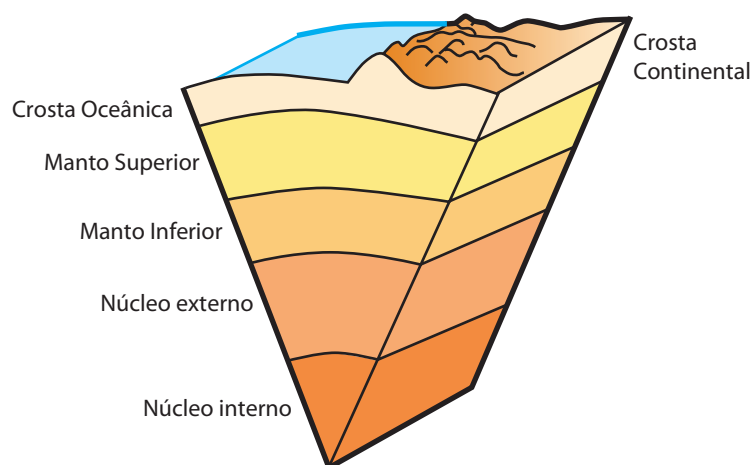
4.4 A MASSA DA TERRA

Em princípio, é possível estimar a massa da Terra multiplicando seu volume (calculado por um diâmetro médio) pela densidade do material de que é formada. Trata-se de um cálculo simples, onde o desafio é encontrar o valor correto da densidade a ser considerada. A superfície terrestre está composta por material de diferentes densidades. Os elementos mais leves são os gases atmosféricos e os mais pesados os materiais metálicos. Pode-se considerar as rochas como material predominante, mas ainda assim há variação significativa de densidade entre os vários tipos de rochas. Adotando um valor médio de densidade em torno de 2,7 g/cm³ ou 2700 kg/m³, um cubo de 1 cm de lado feito desse material teria massa de 2,7 g. O volume de uma esfera de diâmetro 12.735 km seria

$$V = [4/3 \times \pi \times (12.735.000/2)]^3 \quad (1)$$

Multiplicando o volume encontrado pela densidade adotada, já convertendo os valores em kg e m, obteremos aproximadamente $M = 3,0 \times 10^{24}$ kg, praticamente metade do valor observado para a Terra.

A massa da Terra só pôde ser estimada com precisão maior após a descoberta da lei da gravitação universal exposta em 1687 pelo físico inglês Isaac Newton (1642-1727). Em 1798, o físico-químico inglês, Henry Cavendish (1731-1810), descobridor do hidrogênio, utilizou a lei da gravitação universal para calcular densidade da Terra, em um experimento que chamou de “pesagem do mundo”. Ele mediu a força de atração que uma esfera grande provocava em outra menor. Depois, mediu a força que a Terra exerce sobre a mesma esfera pequena. Como as forças eram proporcionais às massas e a massa da esfera maior era conhecida, ele determinou a massa da Terra (figura 3). Assim, deduziu sua densidade, estimando-a em 5,48 g/cm³ (ou 5,48 vezes maior que a densidade da água), um valor maior que a densidade das rochas da superfície terrestre, mais leves que as do manto e do núcleo do



4- Interior da Terra (fora de escala e com cores fantasia)

planeta. Esses resultados indicaram imediatamente a diferença de densidade para a superfície e o coração da Terra, apontando que a composição rochosa varia com a profundidade.

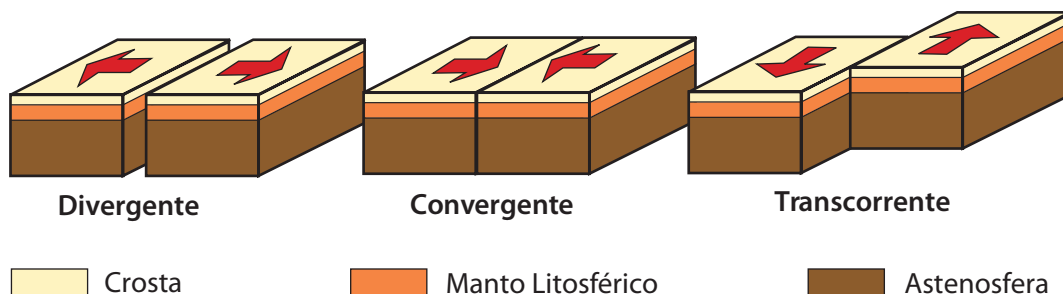
4.5 O INTERIOR DA TERRA

A estrutura interna da Terra pode ser determinada por métodos geofísicos, que investigam as diferentes propriedades físico-químicas das rochas de forma indireta, ou seja, utilizando métodos físicos que dependam destas propriedades. Os sismos são exemplos disso. Analisando a velocidade da propagação de ondas sísmicas em diferentes camadas terrestres é possível conhecer a composição e as propriedades físicas e mecânicas dos componentes dessas diferentes estruturas. Assim, é possível dividir a Terra em três componentes básicos: crosta, manto e núcleo (figura 4).

A crosta é a camada superficial, rígida, ao menos em comparação às demais. Sob os continentes a crosta exibe espessura média de 35 km e densidade que varia entre 2,6 e 2,8 g/cm³. Sob os oceanos a espessura é menor: reduz-se a 6 km em média e a densidade varia de 3,0 a 3,3 g/cm³. Na base da crosta, a velocidade das ondas sísmicas aumenta bruscamente, indicando mudança de propriedades físico-químicas. De fato, esta é a forma de definir a crosta: é a camada superficial da Terra definida pela região onde a velocidade das ondas sísmicas primárias (onda P) varia suavemente, normalmente indo progressivamente de 6,7 km/s a 7,2 km/s. Na base da crosta a velocidade muda abruptamente de 7,2 km/s a 8,2 km/s.

Logo abaixo da crosta começa o manto. Ele é sólido e constituído de minerais silicáticos (compostos de silício e oxigênio), ricos em ferro e magnésio, mas comporta-se como um fluido muito viscoso, difícil de fluir, para grandes esforços e intervalos de tempos muito longos (da ordem de milhares a milhões de anos), por causa das condições de esforços, pressão e temperatura reinantes nesta região.

A densidade do manto varia entre 3,5 g/cm³ e 5,5 g/cm³. A variação de velocidade das ondas sísmicas indica que o manto pode ser dividido basicamente em duas camadas: o manto superior (que vai da base da crosta até 400 km de profundidade) e o manto inferior (que vai de 400 km a 2.900 km de profundidade). Entre essas camadas há uma zona de transição (manto transicional), entre 400 e 650 km, de propriedades intermediárias.



5- Movimentos relativos entre placas (fora de escala).

O núcleo começa em 2.900 km de profundidade e vai até o centro da Terra (6.370 km, em média). A análise das ondas sísmicas revela que o núcleo é constituído por material de alta densidade e também está dividido em duas camadas denominadas núcleo externo e núcleo interno. A porção externa é fluida e vai até 5.100 km de profundidade, concentrando cerca de 30% da massa da Terra, sendo homogênea e composta essencialmente de ferro e níquel, com pequenas quantidades de silício, oxigênio e enxofre.

O núcleo interno está no interior dessa região externa, é sólido e formado basicamente por ferro e níquel. Embora a temperatura no núcleo interno seja maior do que no núcleo externo, a altíssima pressão o mantém em estado sólido. A interação entre as porções externa e interna do núcleo produz o campo magnético terrestre, fundamental para a biosfera, ao atuar como blindagem para partículas eletricamente carregadas que chegam continuamente do Sol.

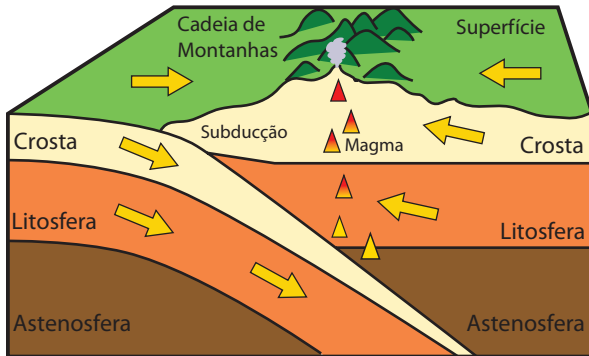
Outra maneira possível de dividir a Terra em camadas é levar em consideração as características de rigidez e fluxo de material. Nessa divisão, a litosfera (literalmente, "esfera de pedra") é a camada rígida mais externa, que vai da superfície ao ponto onde a temperatura atinge os 1.250 °C. A litosfera inclui a crosta e a parte superior do manto e tem mobilidade. As rochas dessa camada apresentam comportamento rúptil, isto é, acumulam esforços até o seu limite de ruptura, quando, então, liberam a energia acumulada quase sempre sob a forma de terremotos.

Abaixo da litosfera começa a astenosfera (literalmente, "esfera frágil"), que atinge aproximadamente 700 km de profundidade. Ela se comporta como um fluido viscoso para grandes esforços atuantes em longos períodos (escala de milhões de anos), como é o caso do deslocamento da litosfera acima dela. Para eventos de curta duração, porém, a astenosfera comporta-se como um sólido elástico.

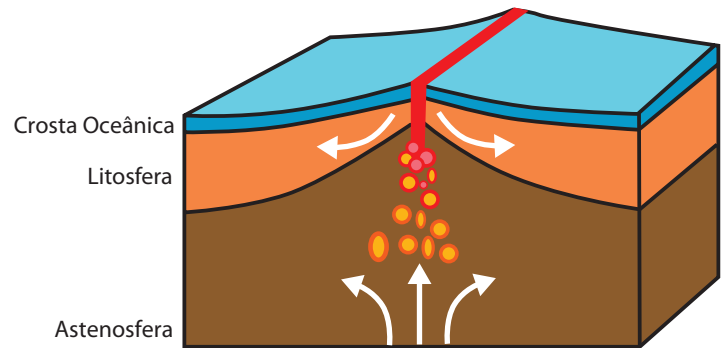
A seguir, vem a mesosfera (literalmente, "esfera do meio") que se estende de 700 km até 2.900 km de profundidade. A mesosfera está submetida a pressões maiores do que as camadas anteriores, o que afeta a viscosidade do material que a compõe e, por consequência, inibe os movimentos de convecção, naturais nesta região por haver uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior desta camada e mobilidade (mesmo que lenta) do material.

4.6 A SUPERFÍCIE DA TERRA

Embora formada por rochas, a superfície terrestre não é uma camada monolítica e estática. Ela na



6- Movimento convergente (fora de escala).



7- Divergência de placas (fora de escala).

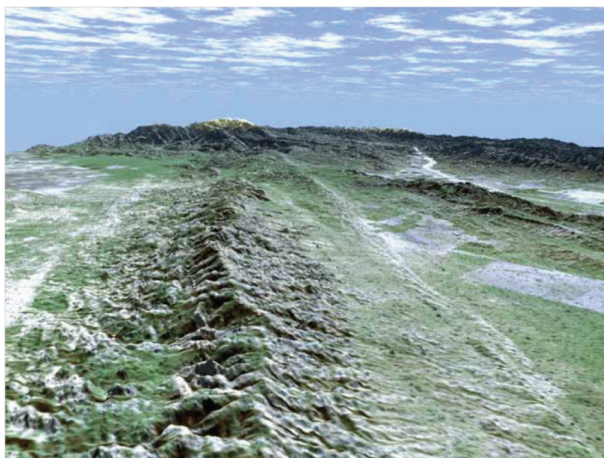
realidade é composta de grandes blocos que se deslocam muito lentamente, flutuando sobre a camada fluida abaixo delas. Estes blocos são chamados de placas litosféricas. Por conta desse movimento, na região fronteira entre as placas, esforços poderosos provocam terremotos e eventualmente vulcanismo. Os movimentos relativos entre as placas permitem definir três tipos de margem de placa: margens de convergência, divergência e transcorrência (figura 5).

A convergência se manifesta quando há colisão direta entre as placas. Nesse caso, as placas sobrepõem-se, e uma delas afunda, num movimento chamado subducção (figura 6). A placa que mergulha é lentamente destruída ao atingir a profundidade em que pressão e temperatura provocam sua fusão (normalmente a mais de 700 km de profundidade). Os Andes, na porção ocidental da América do Sul, são um exemplo claro desse processo. A placa de Nazca, no Oceano Pacífico, mergulha sob a placa Sul Americana, elevando sua borda e dando origem aos Andes, montanhas que continuam em lento crescimento desde o início desta colisão até os dias de hoje. Esse choque também produz terremotos e vulcanismo, como esquematizado na figura 5.

A convergência pode se dar entre placas oceânica-oceânica (Ilhas Marianas, Oceano Pacífico), oceânica-continental (Andes, América do Sul) e continental-continental (Cordilheira do Himalaia, Índia, China, Butão, Nepal, Paquistão).

Na divergência de placas, o processo é oposto, ou seja, os movimentos são divergentes, de separação. Aqui as placas litosféricas se afastam e a ruptura que esse movimento provoca dá vazão ao material proveniente da astenosfera que se solidifica ao longo das bordas das placas e se incorpora a elas. Nessa região ocorrem sismos de menor magnitude, normalmente por resultado do rompimento de porções da placa durante o deslocamento. Este fenômeno é o responsável pela existência da dorsal meso atlântica, uma longa cadeia de montanhas submarinas que desce pelo Oceano Atlântico indo da Islândia, ao norte, até regiões antárticas, no sul (figura 7).

Já no caso da transcorrência o movimento das placas é lateral, sem criação ou destruição de placa. Esse é o caso da famosa falha de San Andreas, na Califórnia, EUA (figura 8). Nessas regiões também ocorrem numerosos terremotos, produzidos pela liberação de energia acumulada ao longo da falha durante muito tempo.



8- Falha de San Andréas (crédito: NASA/JPL-Caltech).

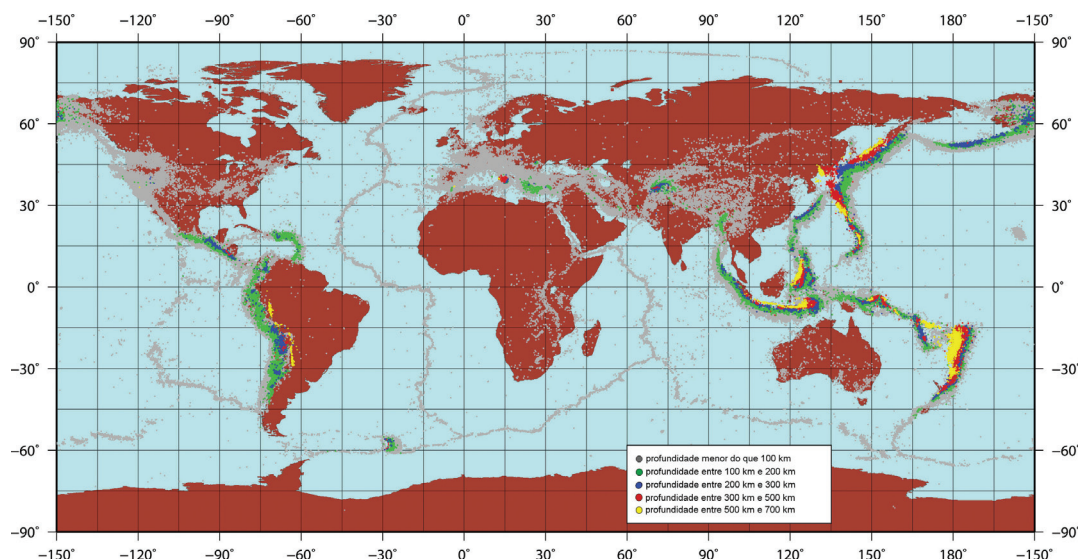
4.7 TECTÔNICA DE PLACAS

Um olhar atento às linhas de costa da América do Sul e da África Ocidental, voltadas para o Oceano Atlântico, evidencia uma intrigante similaridade, como se fossem peças de encaixar de um quebra-cabeças. O cartógrafo alemão Abraham Ortelius (1527-1598) foi quem primeiro notou esse fato, em 1596, e sugeriu que os dois continentes deveriam estar unidos no passado, tendo sido separados por forças provenientes de inundações e terremotos.

Quase três séculos depois, o meteorologista alemão Alfred Wegener (1880-1930) apresentou uma teoria para explicar o que sempre havia parecido uma intrigante coincidência. Além da similaridade das linhas de costa, ele considerou a distribuição de fósseis e as evidências sobre as dramáticas mudanças de clima ocorridas no passado geológico da Terra, e elaborou a teoria da deriva continental. Essa teoria propunha que há 200 milhões de anos todas as massas continentais formavam um bloco único, a Pangea (do latim pan, “todo”, e gea, “terra”). Posteriormente, a Pangea teria se fragmentado, dando origem aos continentes e oceanos atuais.

De fato, esse processo de fragmentação e deslocamento iniciou-se há cerca de 230 milhões de anos, quando os dinossauros iniciavam seu longo reinado, e continua ativo. Inicialmente, a Pangea dividiu-se em dois grandes supercontinentes: Laurásia (contração dos termos Laurentia, nome dado à América do Norte e Groelândia, e Ásia) e Gondwana (denominação ao conjunto dos continentes sul-americano, africano, australiano, antártico, acompanhado de Nova Zelândia, Madagascar e Índia). Mas, pelo teor revolucionário de sua teoria, inicialmente Wegener foi interpretado com suspeição e chegou a ser considerado “charlatão” no meio científico de sua época. Somente décadas após a sua morte, que se deu em 1930, quando ele ia instalar uma estação meteorológica na Groelândia, suas proposições foram aceitas e reconhecidas como um importante avanço no conhecimento da dinâmica da Terra.

No final dos anos 1950, estudos das rochas do fundo oceânico da região nordeste do Pacífico mostraram que o assoalho marinho era muito jovem e que se movimentava, ou seja, continentes e fundo oceânico estão envolvidos em uma espécie de dança global. Assim, a deriva dos continentes deu lugar a uma teoria mais sofisticada, a Tectônica de Placas, ou Tectônica Global. Segundo essa concepção, as placas litosféricas, que englobam continentes e assoalho oceânico, afastam-se nas margens de divergência, como é o caso das dorsais oceânicas, e colidem nas zonas de convergência, como



9- Distribuição dos terremotos no mundo evidenciando as bordas das placas.

ocorre nos Andes e Himalaia. As bordas das placas podem ser facilmente delineadas observando-se a distribuição de terremotos, que normalmente ocorrem nestas regiões.

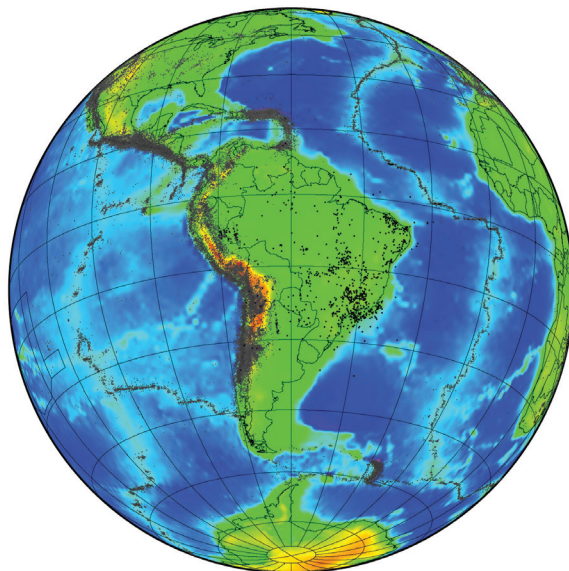
4.7.1 PLACAS E SISMICIDADE

Dependendo do movimento relativo entre as placas, que normalmente é da ordem de centímetros por ano, as tensões se acumulam em diferentes pontos, principalmente nas vizinhanças das bordas, até atingir o limite de resistência das rochas locais e provocar rupturas. O movimento repentino produzido pela ruptura rochosa nesses pontos de atrito libera energia sob a forma de vibrações (ondas elásticas) que se propagam em todas as direções. O ponto onde ocorreu a ruptura é chamado foco ou hipocentro. A projeção desse ponto na superfície ao longo da vertical é denominada epicentro. A localização exata de um terremoto é calculada a partir dos registros de sismógrafos espalhados pela superfície terrestre. Esse processo registra várias componentes da intensidade da vibração e a hora precisa em que se manifestaram.

A intensidade de um terremoto é determinada a partir dos seus efeitos. A escala de intensidades mais utilizada é a de Mercalli Modificada, com 12 graus (expressos em algarismos romanos, de I a XII). Já a magnitude está associada à energia total liberada pelo sismo e pode ser determinada com base nos registros das estações sismográficas que detectaram o sismo. A escala de magnitude mais famosa é a proposta por Charles F. Richter e se baseia na comparação entre a amplitude das vibrações observadas em um sismo e as amplitudes de um sismo escolhido como padrão.

Por ser uma comparação entre amplitudes de movimento, essa escala não apresenta limites inferiores ou superiores. Sismos pequenos podem mesmo apresentar valores negativos de magnitude, caso a amplitude de suas vibrações sejam inferiores às amplitudes das vibrações do sismo padrão. Cada incremento de um ponto na escala Richter corresponde a um aumento de dez vezes na amplitude da vibração, e de mais de trinta vezes na energia liberada. Assim, um terremoto de magnitude sete libera muito mais energia do que um terremoto de magnitude seis, por exemplo. Terremotos com grande poder de destruição quase sempre têm magnitude superior a sete.

Normalmente os sismos ocorrem ao longo dos limites das placas litosféricas, o que faz com que territórios de países que residem totalmente no interior das placas, como é o caso do Brasil, que está lo-



10- Distribuição dos sismos no Brasil.

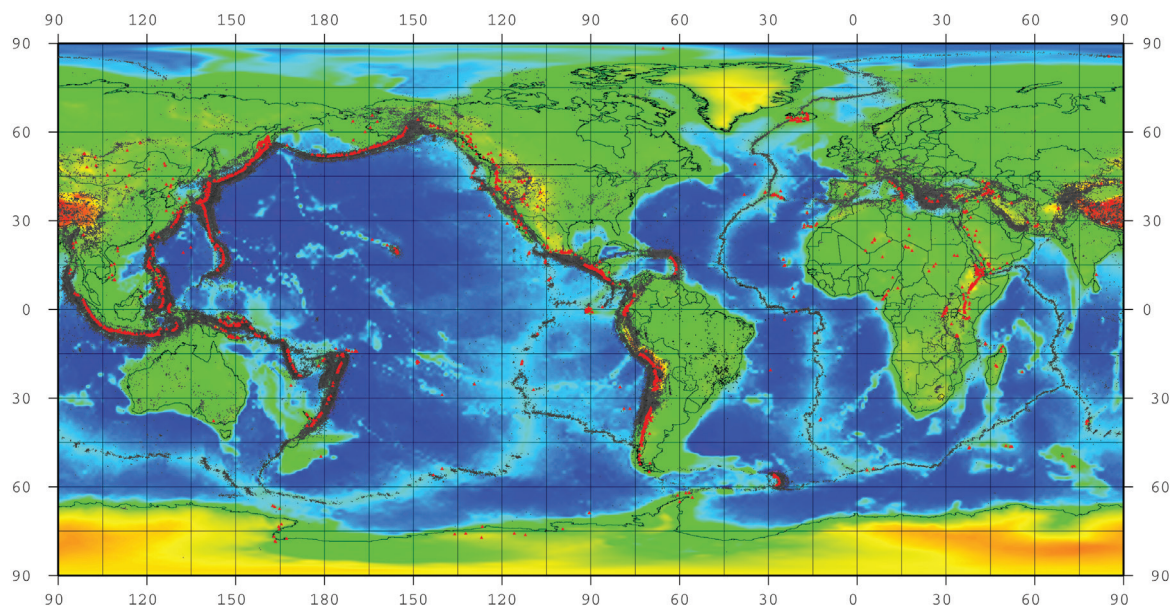
calizado no centro da placa sul-americana, tenham baixa atividade sísmica. Aqui, as regiões com maior atividade sísmica são os estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Mato Grosso, e a região da costa sudeste. Esta atividade sísmica geralmente é causada por situações geológicas locais (figura 10).

No interior das placas também ocorrem tremores, chamados sismos intraplaca, como reflexos de tensões compressivas e extensivas nas suas bordas. Esse tipo de sismo ocorre em pequenas profundidades, até aproximadamente 35 km, com magnitudes relativamente pequenas se comparadas com a sismicidade existente nas bordas das placas.

Nas bordas de divergência o material situado abaixo da placa litosférica ascende à superfície na forma de magma, normalmente pelo alívio de pressão gerado pela ruptura das placas nesta região. Já nas bordas de convergência, se ao menos uma das placas envolvidas for oceânica, normalmente temos vulcanismo causado pela liberação da água presente nas rochas quando estas chegam a uma determinada profundidade, que faz com que o material se funda e suba à superfície.

Magma pode ser entendido como sendo rocha fundida, de consistência pastosa/líquida, com temperatura entre 700 e 1200 °C, dependendo principalmente de sua composição. Basicamente, o magma apresenta três componentes: um líquido (representado pela rocha fundida), um sólido (formado por minerais já cristalizados ou fragmentados de rocha, transportados em meio à fração líquida) e um gasoso (constituído por material volátil, dissolvido na parte líquida, como H_2O , CO_2 , CH_4 , SO_2 e outros). Quando atinge a superfície, o magma libera a parte volátil para a água ou atmosfera, extravasa na forma de lava e se resfria, cristalizando-se para formar rochas vulcânicas.

Durante a erupção, gases contidos no magma são liberados, algumas vezes de forma explosiva, gerando eventos violentos que ejetam matéria tão fina quanto as cinzas vulcânicas ou maiores, como grandes fragmentos de rocha. As erupções mais violentas são explosivas e liberam gases e cinzas vulcânicas capazes de formar nuvens com dezenas de quilômetros de altura. Um exemplo famoso desse tipo de vulcanismo é o do Monte Vesúvio, no ano 79 desta era, descrito por Plínio, o Novo, que matou seu pai Plínio, o Velho (23-79), autor de *Naturalis Historia*, compêndio das ciências antigas distribuído em 37 volumes e dedicado a Tito Flavio, futuro imperador de Roma. Essa explosão do Vesúvio também soterrou as cidades de Pompeia e Herculano, matando a maior parte de suas populações. Na atualidade, erupções do monte Santa Helena, nos EUA, e Pinatubo e Mayon, nas Filipinas, têm apresentado esta característica.



11- Distribuição de terremotos e vulcões.

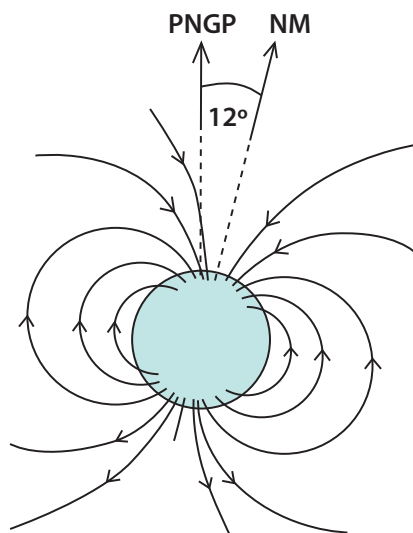
Nessas erupções, tidas como um dos tipos mais poderosos e destruidores, foram liberados fragmentos de rocha, lava viscosa e densas colunas de fumaça e gás. Erupções desse tipo produzem com frequência fluxos piroclásticos (nuvens de cinza vulcânica e gás aquecido entre 100 e 800 °C, que podem deslocar-se à velocidade de até 160 km/h pelas encostas de vulcões durante erupções explosivas). Os fluxos piroclásticos normalmente se deslocam rente ao solo, acompanhando as irregularidades do relevo, e podem formar camadas com vários metros de espessura, como ocorreu no caso das cidades de Herculano e Pompeia, que foram soterradas por mais de seis metros de material piroclástico na erupção de 79 d.C., e só foram descobertas no século XVIII.

Popularmente os vulcões são classificados quanto à sua atividade como ativos, dormentes e extintos, dependendo de sua atividade em tempos históricos. Esta nomenclatura, porém, é inadequada para os cientistas, que normalmente consideram ativos os vulcões que apresentam pelo menos um registro de erupção nos últimos dez mil anos. Cerca de 500 vulcões são tidos como ativos em todo o planeta, mas grande parte está submersa, com a maioria distribuída ao longo de uma estreita faixa que circunda o litoral do Oceano Pacífico, conhecida como Cinturão de Fogo (figura 11).

4.8 MAGNETISMO TERRESTRE

Magnetismo é o fenômeno físico responsável pela atração e repulsão entre certos metais. O primeiro filósofo grego, Tales de Mileto (640-550 a.C.) parece ter sido o primeiro a referir-se a um material originário da região de Magnésia, cidade da Ásia Menor, atual Turquia, com capacidade de atrair objetos ferrosos mesmo sem contacto físico direto.

A região em torno do corpo que exerce ações magnéticas é denominada campo magnético. O campo magnético pode ser gerado essencialmente de duas formas: pela movimentação de cargas elétricas ao redor de um material metálico (como é o caso dos eletroímãs), ou por magnetização permanente adquirida por um material (como é o caso dos ímãs naturais). O campo magnético terrestre é gerado pela movimentação relativa entre as partes líquida e sólida do seu núcleo metálico. Esse campo é atenuado pelo manto, composto essencialmente de material eletricamente isolante, mas estende-se para além da superfície terrestre.



12- O eixo do campo magnético terrestre não coincide com o eixo de rotação (veja explicação no texto).

O campo magnético terrestre tem o seu Polo Sul Magnético (PSM) próximo do Polo Norte Geográfico (PNG), e o Polo Norte Magnético (PNM) próximo ao Polo Sul Geográfico (PSG). Por efeito de convenção, os polos PNM e o PNG ficam no hemisfério norte, e os polos PSG e o PSM no hemisfério sul. As posições dos polos magnéticos podem oscilar alguns quilômetros por ano, independentemente um do outro. Em 2005, as coordenadas geográficas dos polos magnéticos são: PNM: Lat = 82° N, Long = 113° O; PMS: Lat = 64° S, Long = 68° L. A agulha magnética da bússola aponta sempre para o eixo norte-sul magnético, que não coincide necessariamente com o norte-sul geográfico. O desvio entre as direções dos polos magnético e geográfico é denominado declinação magnética e varia sobre a superfície terrestre.

Pesquisas em paleomagnetismo (estudo dos campos magnéticos terrestres de épocas passadas) revelam reversão irregular de direção, intensidade e sentido do campo magnético terrestre, com período médio de dez mil a cem mil anos.

4.8.1 MAGNETOSFERA

O campo magnético terrestre envolve o planeta na forma de uma estrutura esfericamente assimétrica, denominada magnetosfera. Na direção do Sol ela é pressionada pelo fluxo de partículas eletricamente carregadas (vento solar) e não ultrapassa cerca de dez raios terrestres, mas na direção oposta pode atingir centenas de raios terrestres. Por isso, por vezes ela é referida como cauda magnética.

O campo magnético atua sobre partículas eletricamente carregadas, como prótons, elétrons e íons, podendo aprisioná-las. A magnetosfera terrestre está carregada dessas partículas, que ficam espiralando no campo magnético num movimento de vai e vem entre os polos magnéticos norte e sul. Um dos primeiros resultados da exploração espacial foi a descoberta, no final da década de 1950, da existência de dois cinturões circundando a Terra. Eles foram denominados Cinturões de radiação de Van Allen, em homenagem ao físico americano James Alfred Van Allen (1914-2006), que descobriu o cinturão interno. Essa estrutura ocupa uma região compacta acima do equador, na altura aproximada de 6.300 km, formada de prótons com energia elevada, capaz de danificar instrumentos e ameaçar a vida de astronautas que permanecerem nessa área por um período prolongado.

O Cinturão de radiação externo contém elétrons e íons de diferentes espécies, com energia menor que as do cinturão interno. Ao contrário do que ocorre na estrutura interna, a densidade de partículas flutua muito no cinturão externo. Ela é máxima durante as tempestades solares, que injetam grandes quantidades de íons e elétrons nesse cinturão.

Região do espaço dominada pelo geomagnetismo, a magnetosfera forma um escudo protetor para o vento solar emitido e produz dispersão à sua volta. Esse desvio protege a biosfera contra efeitos danosos da chuva de partículas solares levando à formação das auroras polares. Normalmente, as auroras são confinadas a regiões próximas aos polos magnéticos. Em períodos de calma solar, essa região tem tamanho médio de 3.000 km, mas essa área pode aumentar para até 5.000 km, com ventos solares mais intensos.

Assim, a "usina de força" das auroras é o vento solar interagindo com a magnetosfera. Quando isso acontece, as partículas eletrizadas da magnetosfera são aceleradas em direção aos polos magnéticos e se chocam com átomos de oxigênio e nitrogênio, num processo semelhante à ionização (eletrização) dos gases do tubo de uma lâmpada fluorescente. Esses choques produzem luz de cores diferentes que caracterizam a aurora, em tonalidades fortes e cintilantes que se estendem por até dois mil quilômetros. A luz emitida pelo nitrogênio tem tom avermelhado, enquanto a do oxigênio é esverdeada, ou próxima do vermelho.

Como os polos magnéticos e geográficos da Terra não estão alinhados, as regiões aurorais também não se alinham com o polo geográfico. Os melhores pontos para a observação de auroras estão no Canadá, para auroras boreais. A Tasmânia e Nova Zelândia são sítios promissores para as auroras austrais.

4.9 ÁGUA: CICLO E AÇÃO GEOLÓGICA

A temperatura superficial da Terra é compatível com a existência de oceanos e com vapor de água na atmosfera, que integra o efeito estufa natural regulador da temperatura ambiente superficial. Água não é privilégio da Terra. Essa substância se mostra com relativa abundância no Sistema Solar, mas a Terra é o único mundo que exhibe água superficial em estado líquido. Dos 510 milhões de km² da

superfície terrestre, 310 milhões são cobertos por oceanos. Outros 189 milhões são de área continental, dos quais 2,5 milhões correspondem a rios e lagos e até 15 milhões são cobertos por geleiras. Em termos percentuais, cerca de 94% da água da Terra estão retidas nos oceanos, 2% nas geleiras e capas de gelo, 4% nas regiões subterrâneas, e traços (menos que 0,01%) em lagos, rios, pântanos, umidade do solo, biosfera e atmosfera.

A atmosfera e hidrosfera atuais são secundárias e não surgiram diretamente do processo de formação da Terra. O manto exibe minerais hidratados (ricos em água), carbonatados (ricos em carbono) e material volátil de natureza diversa. A maior parte dos componentes fluidos foi produzida pela emanção de gases do manto, por vulcanismo e outros mecanismos indiretos, durante todo o tempo geológico. Também é possível que parte significativa da atmosfera e hidrosfera tenha origem extraterrestre. Corpos celestes ricos em água, como cometas e alguns tipos de asteroides, se chocaram com a Terra no passado remoto, especialmente durante o período de bombardeio pesado que se estendeu há até 3,9 bilhões de anos.

Ainda não se sabe exatamente de onde vieram os corpos que contribuíram com o reabastecimento da Terra com água, mas há evidências suficientes para apontar as possibilidades mais prováveis. Asteroides da região mais externa do cinturão principal, que estão mais próximos de Júpiter, são relativamente ricos em água. Além disso, a região além de Netuno é repleta de corpos com oferta ainda maior de água, incluindo os cometas, astros que mais se aproximam da Terra e com maior chance de chocar-se com o planeta.

A água é um recurso renovável, graças ao ciclo hidrológico, em atividade desde a formação da hidrosfera e atmosfera. Este processo envolve o intercâmbio entre os diversos reservatórios de água: oceanos, geleiras, rios, lagos, vapor d'água da atmosfera, águas subterrâneas e água retida nos organismos vivos. Durante o ciclo hidrológico a água passa pelos estados líquido, gasoso e sólido. Evapora nos mares, rios e lagos, transpira na biosfera, forma nuvens atmosféricas, que se precipitam como chuvas, neve e granizos. Ao atingir o solo, parte dessa precipitação infiltra-se, abastecendo aquíferos, os reservatórios subterrâneos mais profundos, enquanto parte escoar para rios, lagos, mares e oceanos.

Apesar de a dinâmica do ciclo hidrológico ser essencialmente abastecida pela energia solar, ela é complexa, pois envolve desde fatores meteorológicos – vento, chuva, insolação – a ações antrópicas,

ou seja, produzidas pelo homem, que, além de modificar a paisagem, provoca efeitos que afetam o clima. Assim, a água pode evaporar-se de um lugar árido e precipitar em oceanos, ou ainda, enquanto inunda cidades, exibe déficits em represas ou em áreas carentes de irrigação. Segundo o Programa Hidrológico Internacional da Unesco o ciclo hidrológico envolve um volume de água de 577.200 km³/ano, dos quais, aproximadamente 11 mil km³ corresponde ao volume de água potável para consumo humano, animal e atividades agrícolas e industriais.

Um fator importante no gerenciamento da água é a temperatura. Valores muito baixos levam à solidificação. E superfícies recobertas por gelo e neve refletem mais intensamente a luz solar, contribuindo para o resfriamento ambiental. Já valores elevados produzem evaporação e tornam a mais úmida. O efeito estufa atmosférico – agora ampliado pela liberação antrópica de gases que estimulam esse processo – acelera ainda mais a evaporação e aquecimento global. Isso pode elevar o vapor de água para altitudes atmosféricas mais elevadas, onde a incidência de luz ultravioleta é maior. Isto é um enorme perigo, pois a luz ultravioleta provoca a fotodissociação da água, separando hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio é um gás leve e pode perder-se no espaço. A longo prazo, este poderia ser um mecanismo eficiente de perda irreversível de água atmosférica. Mas esse processo é compensado por um reabastecimento feito por porções de cometas formadas por água.

A presença da água é importante não só para a vida como a conhecemos, mas também para manter a Terra com temperatura amena. A atmosfera atual compõe-se de nitrogênio, oxigênio, um pouco de argônio, água, dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases.

A atmosfera primitiva deve ter sido muito mais rica em dióxido de carbono e metano, dois agentes eficientes na geração do efeito estufa. Com a presença da hidrosfera, o CO₂ atmosférico acaba agregado aos oceanos nas interações entre mar e ar, e posteriormente, precipitando, na forma de carbonato de cálcio. Os sedimentos calcários das plataformas marinhas carbonáticas são o reservatório final do ciclo biogeoquímico do carbono, na Terra. Água e dióxido de carbono são importantes para a manutenção da biosfera, desde que em equilíbrio.

A água subterrânea participa de um conjunto de processos geológicos que modificam os materiais terrestres, transformando minerais, rochas e paisagens. A zona de ocorrência de água subterrânea é uma região onde se inicia a maioria das formas de relevo, pois esses estoques são o principal meio das reações do intemperismo químico. O movimento conjunto da água subterrânea e super-

ficial é o agente mais ativo na escultura da superfície terrestre. Os principais processos dessa ação são intemperismo químico (pedogênese), escoamento de solo alagado (solifluxão), erosão interna (solapamento) e dissolução (carstificação). O intemperismo químico provoca desintegração e decomposição das rochas por ação química, processo que forma determinado tipo de solo.

A solifluxão produz escoamento de material em encostas por decorrência de alagamento. O material não consolidado (inseguro) em encosta tem estabilidade parcialmente assegurada pelo atrito. A força gravitacional atua sempre no sentido de deslocá-lo para áreas mais baixas. E, quando a resistência fornecida pelo atrito é superada, o solo de encostas desliza. Quando saturado por excesso de água, a cobertura aumenta seu peso e a camada do solo em contato com a superfície consolidada da encosta torna-se muito fluída, diminuindo drasticamente o atrito.

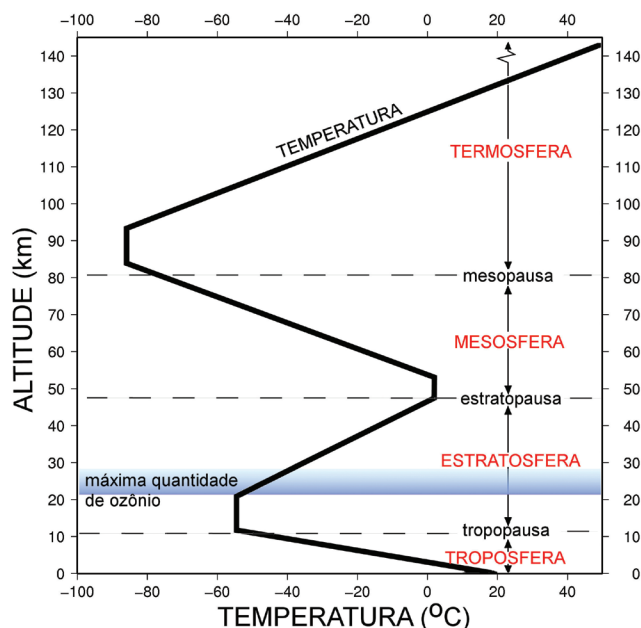
A erosão interna, ou solapamento, é o agente responsável pelas voçorocas, erosão que ameaça cidades, mas também são um problema em zonas rurais agrícolas. Essas erosões, altamente destrutivas, ampliam-se rapidamente e abrem fendas e cortes em vertentes, em alguns casos com profundidade de vários metros. O fundo dessas fendas, quase sempre, está coberto por material desagregado, onde aflora água do lençol freático.

A carstificação produz efeitos característicos de processos de dissolução de rochas como o calcário, com drenagem subterrânea, cavernas e dolinas (depressões circulares formadas pelo abatimento de solo e rochas do teto de caverna com drenagem subterrânea.). Um exemplo típico de região moldada assim é Krasz, na atual Croácia e Eslovênia. Essas áreas são caracterizadas pela presença de rios subterrâneos com cavernas e superfície acidentada, dominada por depressões com paredões rochosos e torres de pedra. Krasz foi traduzida para alemão como Krast, e para o português como Carste, nome para o processo responsável pela origem dessas formações.

4.10 CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA

Como a hidrosfera, a atmosfera da Terra evoluiu desde sua formação. Após o resfriamento da superfície primitiva do planeta, ocorreu acúmulo de material gasoso, incluindo água, proveniente do interior terrestre, por processos vulcânicos, e do espaço, pelo impacto de cometas.

13 - Estrutura da atmosfera



A atmosfera é parcialmente responsável pelas grandes transformações que ocorrem na superfície planetária, incluindo modulação de temperatura por um dos efeitos da biosfera. O ciclo biogeoquímico do carbono, resultado da interação entre atmosfera, hidrosfera, biosfera e litosfera, permitiu que o CO_2 , principal componente da atmosfera primitiva e eficiente agente de efeito estufa, fosse incorporado por carbonatos marinhos, evitando assim que a Terra fosse um planeta quente como Vênus.

A atmosfera terrestre é composta essencialmente por gases, principalmente nitrogênio (78%) e oxigênio (21%), além de argônio (1%). O restante reúne gases diversos. Ela contém ainda partículas sólidas e aerossóis (partículas líquidas).

O volume de oxigênio livre torna a atmosfera terrestre atual bem distinta daquela que predominou no estágio primitivo e dos planetas do Sistema Solar. Acredita-se que o conteúdo de oxigênio aumentou gradualmente com o processo de fotossíntese inicialmente realizado por microrganismos, há pelo menos 2,7 bilhões de anos. Assim, a atmosfera foi se tornando oxidante e potencialmente tóxica para os organismos da época, o que favoreceu o desenvolvimento do metabolismo aeróbico, a reprodução sexuada, organismos multicelulares e, com isso, a complexidade das formas vivas.

A atmosfera da Terra começa na superfície do planeta, com pressão de 1.000 mbar ao nível do mar. Essa primeira camada é a troposfera, porção que concentra cerca de 75% da massa atmosférica e estende-se até aproximadamente 12 km. É mais espessa entre os trópicos e delgada nas regiões polares. Nela ocorrem praticamente todos os fenômenos da dinâmica externa do planeta – nuvens, ventos, chuvas e raios, entre outros processos (figura 13).

Os valores de temperatura e pressão variam localmente. E diminuem com a altura. Por conta disso, os componentes atmosféricos adquirem uma dinâmica que se traduz por movimentos verticais e horizontais. As temperaturas nessa camada podem variar de 40 °C a -60 °C. Aqui se encontra nitrogênio molecular, oxigênio e quantidades reduzidas de água, dióxido de carbono (CO_2) e metano, entre outros gases minoritários.

Acima da troposfera, e até cerca de 50 km de altura, a temperatura volta a aumentar com a altura, de -70 °C a -5 °C. Essa camada, a estratosfera, abriga a camada de ozônio, uma espécie de filtro natural do planeta contra a radiação ultravioleta do Sol. A absorção dessa radiação solar pelo ozônio faz com que uma molécula desse gás se fotodissocie em O_2 (oxigênio molecular) e O (oxigênio atômico). Com o tempo, o oxigênio atômico volta a se unir ao oxigênio molecular, recompondo o ozônio. Nes-

se processo, de fotodissociação/recombinação, a maior parcela de luz ultravioleta incidente, perigosa para a biosfera, é absorvida. Alguns produtos químicos utilizados industrialmente destroem o ozônio dessa camada atmosférica. É o caso do grupo clorofluocarbonos, agora vetados, mas em décadas anteriores utilizados em aerossóis domésticos e sistemas de refrigeração.

É na estratosfera que se inicia a difusão da luz solar que produz a cor azul do céu. Aviões supersônicos e balões de medição climática podem atingir essa camada. Os aviões deslocam-se pela estratosfera porque ela é mais estável que a troposfera.

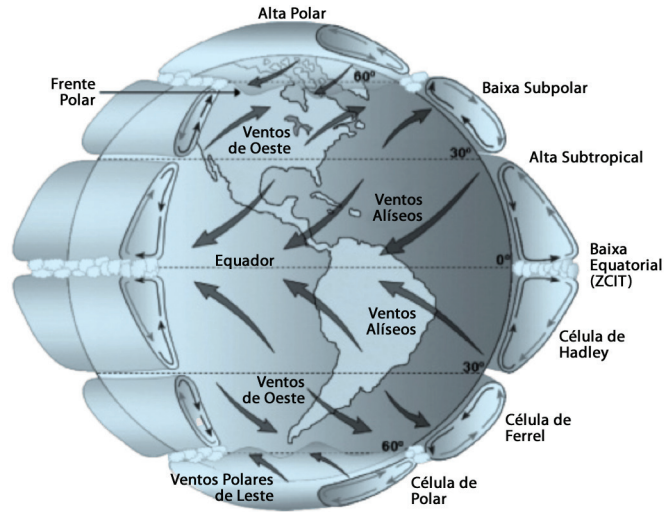
Já a mesosfera, camada acima da estratosfera, estende-se até cerca de 85 km. A temperatura na mesosfera volta a cair com a altura, variando entre -10°C e -100°C . Essa é uma camada extremamente fria, pela ausência de gases ou nuvens capazes de absorver energia solar. Na mesosfera ocorrem os fenômenos de aeroluminescência das emissões da hidroxila (OH) e de meteoros decorrente da combustão dos meteoroides (partículas/blocos rochosos cósmicos que se chocam com a Terra).

A camada acima da mesosfera, entre aproximadamente 85-500 km, é a termosfera. Nessa região a temperatura aumenta com a altitude até onde a densidade das moléculas é baixa e os movimentos tão aleatórios, que raramente se chocam. As temperaturas na termosfera podem atingir os 1.000°C . É a camada onde se formam as auroras polares, como resultado do vento solar e onde orbita o ônibus espacial.

As elevadas temperaturas dessa camada decorrem da intensa luz solar que incide sobre ela, produzindo ionização e, por isso mesmo, elevar a disponibilidade de elétrons livres, produzindo a ionosfera, responsável pela reflexão das ondas de rádios utilizadas em comunicação de solo. As auroras boreais (polo norte) e austrais (polo sul) ocorrem nessa região da atmosfera.

A última camada da atmosfera terrestre, envolvendo a ionosfera, é a exosfera (do grego, esfera de fora, ou para fora). Ela começa a aproximadamente 500 km de altura, com pressão de 10^{-8} mbar (100 bilhões de vezes menor que a pressão ao nível do mar). As espécies químicas que chegam a esta altura perdem-se no espaço. Esse processo ocorre quando a energia cinética (energia de movimento) da espécie gasosa (geralmente átomos de hidrogênio) supera a retenção gravitacional da Terra. Em termos de velocidade, pode-se dizer que a velocidade da partícula supera a velocidade de escape (velocidade necessária para vencer a gravidade) naquela altura. Na exosfera circulam os satélites artificiais. Não existe uma altura específica que delimite atmosfera e espaço,

14- Modelo conceitual da circulação global atmosférica, indicando as células meridionais, as direções dos ventos próximos à superfície, e as latitudes típicas de baixas e altas pressões (F.R. Martins; R.A. Guarnieri e E.B. Pereira, *Rev. Bras. Ensino Fís.* vol.30 no.1 São Paulo 2008).



mas pode-se dizer que, além de 1.000 km, a atmosfera é extremamente rarefeita e basicamente composta de hidrogênio.

4.11 CIRCULAÇÃO E ZONAS CLIMÁTICAS

A potência de radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre corresponde a 343 W/m^2 ou cerca de meia caloria por metro quadrado por minuto. De toda essa energia, cerca de 100 W/m^2 é refletida de volta ao espaço e o restante absorvido pela Terra. Isso provoca uma estufa (aquecimento) de 31°C , aproximadamente.

A intensidade média da radiação que atinge a superfície da Terra é função da latitude, sendo máxima no equador e mínima nos polos, e decorre do fato de o planeta ter forma aproximadamente esférica. Assim, quanto maior a latitude, menor o ângulo de incidência relativamente ao horizonte local. Como o eixo de rotação da Terra está inclinado em cerca de $23,5^\circ$ em relação à vertical do plano que contém a órbita terrestre, a incidência de luz muda durante o ano.

O processo de transferência de calor entre baixas e altas latitudes ocorre através dos sistemas de circulação atmosférica e oceânica. Os movimentos verticais são devidos basicamente à diferença de temperatura e os horizontais ocorrem, sobretudo por influência da rotação da Terra. Esse efeito foi descrito pela primeira vez em 1835, pelo matemático e engenheiro francês Gustave-Gaspard Coriolis (1792-1843). O efeito que leva seu nome (Coriolis) resulta de uma força inercial (de resistência) que se aplica a corpos em movimento sobre superfícies em rotação, caso da atmosfera em relação ao solo. Essa força inercial atua à esquerda da direção do movimento para rotação em sentido horário e à direita para rotação em sentido anti-horário. Na realidade, o objeto não se desvia da linha reta, mas aparenta esse comportamento em função do movimento da superfície sob ele. A magnitude da força de Coriolis na Terra é proporcional ao seno da latitude local. É igual a zero no equador e máxima nos polos.

A rotação da Terra também influencia padrões climáticos. O vento, por exemplo, resulta do deslocamento do ar de uma área de alta pressão para uma de baixa pressão, desviando a direção do vento em sentido anti-horário sob baixa pressão no hemisfério norte, e em sentido horário no hemisfério

sul. A figura 14 mostra o padrão de circulação atmosférica na Terra e as zonas climáticas, definidas pelo ângulo de inclinação do eixo de rotação da Terra. A zona entre os trópicos de Câncer ($23,5^\circ$) e de Capricórnio ($-23,5^\circ$) é denominada tropical. As regiões entre os trópicos e os círculos polares são as temperadas. As zonas polares situam-se no interior dos círculos polares.

Uma das primeiras contribuições ao modelo de circulação geral foi feita em 1735 pelo advogado e meteorologista amador inglês George Hadley (1685-1768). Considerando que a energia solar impulsiona os ventos, Hadley propôs que o contraste de temperatura entre os polos e o equador cria uma circulação térmica semelhante à da brisa marítima. Assim, o aquecimento desigual da Terra faria o ar se mover para equilibrar as desigualdades. Na zona tropical, a circulação se dirige para o equador na superfície e para os polos em nível superior, formando uma célula de Hadley em cada hemisfério. O vento que se dirige para o equador é desviado para oeste pela força de Coriolis, formando os ventos alísios. No hemisfério norte, os alísios vêm de nordeste, e no hemisfério sul, de sudeste. Eles se encontram próximos ao equador, e formam uma zona de baixa pressão equatorial.

No modelo de três células, a circulação na zona temperada é oposta à da célula de Hadley. A corrente na superfície desvia para os polos e, devido à força de Coriolis, os ventos têm forte componente de oeste, formando os ventos de oeste em latitudes médias, mais variáveis que os ventos alísios.

Sistemas planetários

Enos Picazzio

5.1 INTRODUÇÃO

5.1.1 DESCRIÇÃO DO CAPÍTULO

5.1.2 OS MODELOS PLANETÁRIOS

5.1.3 O QUE SÃO SISTEMAS PLANETÁRIOS?

5.1.4 O QUE É SISTEMA SOLAR?

5.2 OS PLANETAS GASOSOS DO SISTEMA SOLAR

5.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

5.2.3 ATMOSFERA E ESTRUTURA DOS PLANETAS GASOSOS

- Júpiter
- Saturno
- Urano
- Netuno

5.3 PLANETAS ROCHOSOS DO SISTEMA SOLAR

- Vênus
- Mercúrio e Marte

5.4 OS PLANETAS-ANÕES

5.5 OS SATÉLITES

- Lua
- Satélites de Marte
- Satélites de Júpiter
- Satélites de Saturno
- Satélites de Urano
- Satélites de Netuno

5.6 ASTEROIDES E FRAGMENTOS ROCHOSOS (METEOROIDES)

- Cinturão Principal de Asteroides
- Grupos e Famílias de Asteroides
- Composição química e origem

5.7 CORPOS TRANSNETUNIANOS

- Cinturão de Edgeworth-Kuiper
- Cometas

5.8 ANÉIS PLANETÁRIOS E METEOROIDES

- Anéis
- Meteoroides (Fragmentos Rochosos)

5.9 ESTRUTURA E FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

5.9.1 A ESTRUTURA

5.9.2 A FORMAÇÃO

5.10 SISTEMAS PLANETÁRIOS EXTERNOS (EXOPLANETAS OU PLANETAS EXTRASSOLARES)

5.10.1 INTRODUÇÃO

5.10.2 AS TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO E OS EXOPLANETAS CONHECIDOS

5.10.3 EXOPLANETAS CONHECIDOS

Densidade	Composição química predominante	Tipo de objeto
Baixa	Gasosa	Gasoso
Intermediária	Mistura de gases congelados e rochas	Misto ou Composto
Alta	Rochosa	Rochoso

Tabela 1- Densidade e composição química dos objetos do Sistema Solar.

5.1 INTRODUÇÃO

5.1.1 DESCRIÇÃO DO CAPÍTULO

O objetivo deste capítulo é discutir a origem e as características do sistema de objetos que surge durante a formação de uma estrela, e que permanece ligado a ela por ação gravitacional. O sistema melhor conhecido é o do Sol, o Sistema Solar, a que nosso planeta pertence. Muitos sistemas ligados a outras estrelas estão sendo descobertos, cujas características conhecemos muito pouco, na realidade conhecemos apenas alguns de seus planetas.

A depender das condições submetidas, a matéria adquire propriedades distintas. Essa distinção é definida como fase ou o estado físico da matéria. Apesar de existirem vários estados, vamos considerar neste capítulo apenas os mais comuns, a saber: sólido, líquido, gasoso e plasma (gás parcialmente ionizado e magnetizado). No estado sólido, a quantidade de matéria possui forma e volume. No estado líquido, a quantidade de matéria mantém apenas volume. No estado gasoso assim como no plasma, a quantidade de matéria pode assumir forma e volume diversos, a depender das condições em que está encerrada.

Sob pressões elevadas um gás pode se tornar líquido ou sólido. Um planeta grande tem matéria nos três estados fundamentais (sólido, líquido e gasoso). Podemos classificar os objetos celestes segundo sua composição química predominante, adotando a densidade (razão entre massa e volume) como parâmetro físico classificatório. Desta forma, teremos basicamente três classes de objetos, identificados na tabela 1.

Esta classificação será adotada neste capítulo e a distribuição do assunto será a seguinte: começaremos com uma introdução histórica, depois definiremos genericamente o que são sistemas planetários e o que entendemos por Sistema Solar. Em seguida, analisaremos os objetos do Sistema Solar, seguindo aproximadamente uma ordem decrescente de tamanho. Feito isto, discutiremos formação e a estrutura do Sistema Solar. Finalmente, analisaremos os sistemas planetários que contêm os exoplanetas já conhecidos.

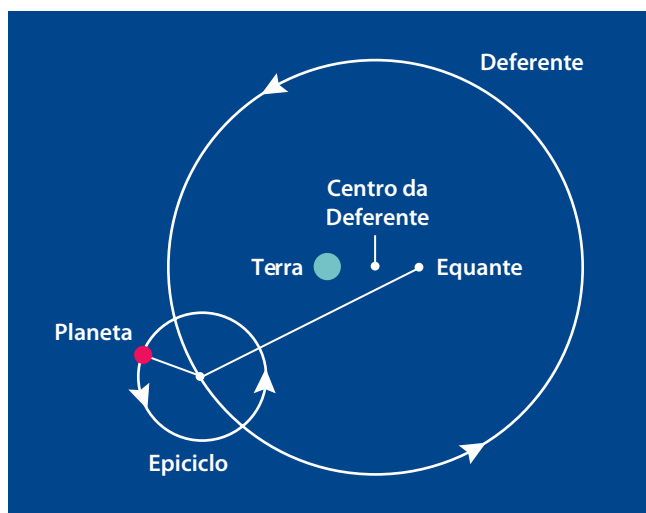
5.1.2 OS MODELOS PLANETÁRIOS

Durante séculos a concepção humana do cosmos foi discutida à luz da filosofia e dos conhecimentos científicos da época. Na concepção geocêntrica a Terra ocupava um local privilegiado e único: o centro do Universo. Esta visão perdurou até o início do século 16. O sucesso deste modelo geocêntrico deve-se muito a dois fatos. O primeiro é que os movimentos aparentes são relativos ao observador na Terra, ou seja, o universo aparente é geocêntrico. O segundo fato é a inexistência de tecnologia que propicias-se medidas precisas de posição. As observações eram visuais os erros superavam dois minutos de arco. O uso do telescópio na astronomia ocorreu apenas em 1609, com a iniciativa de Galileu Galilei.

O geocentrismo baseava-se essencialmente em dois princípios: o da excelência dos movimentos circulares e uniformes (posteriormente contestada pelas Leis de Kepler) e o da inalterabilidade do cosmos (que Tycho Brahe colocou em discussão ao observar a explosão de uma supernova, em 1572, e um cometa, em 1577).

Cláudio Ptolomeu nasceu no Egito, faleceu em Alexandria e viveu aproximadamente entre os anos 85 e 165. Em sua obra de treze volumes, conhecida pelo nome latino *Almagestum*, Ptolomeu sistematizou o sistema geocêntrico, compilou os conhecimentos de 500 anos de astronomia grega e desenvolveu teorias próprias. Ptolomeu descreve matematicamente os movimentos dos planetas de modo a possibilitar o cálculo preciso dos movimentos observados nos céus. Em grande medida, a coerência matemática da sua teoria tornou suas ideias a matriz do pensamento astronômico sobre o universo durante 17 séculos.

O universo ptolomaico era essencialmente o aristotélico, ou seja, um Cosmo finito, constituído de esferas concêntricas, com a Terra imóvel no centro. A atmosfera chegaria até a altura da Lua, definindo o espaço do mundo “sub-lunar”, constituído por quatro elementos: terra, água, fogo e ar. A partir da esfera da Lua, no mundo “supra-lunar”, constituído de um “quinto elemento”, o éter, haveria uma série de esferas transparentes (que foram chamadas orbes) girando em torno da Terra e levando consigo os planetas Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno (os planetas conhecidos na época), além do Sol. A última das esferas conteria as chamadas “estrelas fixas”, o *Primum Móbile*, “Primeiro Motor”. Para além deste, não haveria movimento, nem tempo, nem lugar (espaço), daí a noção de um Cosmo finito ou “mundo fechado”. Aristóteles usou um conceito filosófico, metafísico (abstrato), o



1- O sistema geocêntrico utilizava como artifício deferentes e epiciclos para explicar o movimento retrógrado dos planetas. Este esboço genérico, repete-se para cada um dos planetas.

“Motor Imóvel”, para referir-se à causa que impulsionaria rotação no Primeiro Motor, o qual transmitiria seu movimento às demais esferas. Os planetas estavam dotados de movimentos próprios que se somavam ao do *Primum Mobile*. Ptolomeu afirmava que os planetas descreviam órbitas circulares chamadas epiciclos. O centro do epiciclo movia-se sobre um círculo chamado deferente, cujo centro situava-se entre a Terra e o equante. Os movimentos (planeta no epiciclo e epiciclo no deferente) eram uniformes quando vistos do equante. Visto da Terra, no entanto, a velocidade do planeta variava: era maior quando o planeta se aproximava da Terra e menor quando ele se afastava (figura 1).

O polonês Nicolau Copérnico nasceu em 1473 e faleceu 1543. Em 1497 foi para a Itália estudar direito canônico, de início na Universidade de Bolonha. Nesse período leu um resumo do *Almagestum* de Ptolomeu, porém os seus estudos levaram-no a conhecer os trabalhos do grego Aristarco de Samos (310-230 a.C.), que defendia o heliocentrismo. Estudando as fases lunares e os eclipses, Aristarco concluiu que o Sol era muito maior que a Terra e a Lua e estava bem mais distante que nosso satélite. Foram estas conclusões que o levaram a admitir que o centro do universo estivesse no Sol e não na Terra. Além disso, ele afirmava que a Terra girava uma vez por dia sobre seu eixo e completava cada ano uma volta em torno do Sol.

O modelo heliocêntrico proposto por Copérnico tem o Sol como centro em torno do qual se movem todos os planetas, incluindo a Terra. Esse modelo segue em diversos aspectos a estrutura do modelo de Ptolomeu, como a crença em esferas (orbes) transparentes concêntricas, órbitas circulares e movimentos uniformes. Os antigos deferentes, que Copérnico denominava orbes, são circulares e centrados no Sol. Os deferentes heliocêntricos dão melhores resultados que os deferentes geocêntricos de Ptolomeu. Os epiciclos, também presentes no modelo copernicano, introduzem correções menores, podendo tornar as previsões de posição dos planetas próximas daqueles previstas através de uma órbita elíptica. Copérnico descartou o equante.

Embora as previsões de posição dos planetas fornecessem praticamente os mesmos resultados que o modelo de Ptolomeu, os cálculos eram bem mais simples no modelo copernicano.

Tycho Brahe, dinamarquês de família nobre, viveu entre os anos de 1546 e 1601. Ele estudou nas universidades de Copenhague e Leipzig e posteriormente em universidades alemãs. Foi nessa época que surgiu seu interesse pela astronomia e pelo desenvolvimento de instrumentos astronômicos. Seu trabalho foi importante também por ter desenvolvido uma metodologia que lhe

fornecia maior precisão na determinação das posições dos planetas. Ele é considerado o maior astrônomo observador da era pré-telescópica.

Tycho aceitava o modelo copernicano, mas refutava o Sol como centro do universo. Ele acreditava que os planetas giravam em torno do Sol, mas este girava em torno da Terra. Seu argumento era coerente com suas observações: se a Terra circulava o Sol como dizia Copérnico então ele deveria notar um deslocamento (paralaxe) nas posições das estrelas fixas da esfera. Essa paralaxe era imperceptível nas observações, logo a Terra estava no centro.

Em 1600 Tycho Brahe convidou Johannes Kepler, que já tinha feito fama de excelente matemático, para ser seu assistente e calcular as órbitas planetárias a partir de suas observações. O maior legado de Brahe foi sem dúvida o conjunto de medidas coletadas ao longo de décadas de observação. A precisão obtida por Brahe era em média dez vezes maior que a do *Almagesto*. Os dados astronômicos levantados por Tycho foram usados por Kepler para deduzir as leis do movimento planetário.

Kepler nasceu no sul da Alemanha em 1571 e faleceu em 1630, cerca de um mês antes de completar 59 anos. Em 1584 ingressou no seminário protestante de Adelberg e cinco anos depois na Universidade Protestante de Tübingen. Estudava matemática e astronomia e encantou-se com a simplicidade da teoria de Copérnico.

Kepler iniciou a análise das observações de Tycho Brahe em fevereiro de 1600. Após a morte repentina de Tycho, Kepler dedicou-se ao cálculo da órbita de Marte. Muito provavelmente foi no ano de 1605 que ele chegou à sua famosa descoberta, tornada hoje como a primeira lei de Kepler: "Os planetas se movem em órbitas elípticas e o Sol ocupa um dos focos da elipse".

Importa notar que isto ocorreu três anos depois dele ter chegado à regra da área, em 1602, que hoje chamamos segunda lei de Kepler: "A linha reta que une o planeta ao Sol (raio vetor) varre áreas iguais, em intervalos idênticos de tempo".

Em 1617, Kepler retomou um antigo projeto e começou a escrever seu livro *Harmonice Mundi* (Harmonia do Mundo), publicado em 1619, no qual desenvolve teorias da geometria, música, astrologia e astronomia. Sua investigação levou-o ao que hoje chamamos de terceira Lei de Kepler: "A razão entre o quadrado do período orbital e o cubo do semieixo maior – ou distância média – é constante".

$$\frac{p^2}{d^3} = K \quad (1)$$

com P em anos, d em unidade astronômica e K é igual para todos os planetas.

Estas três leis empíricas foram fundamentais para Isaac Newton desenvolver sua teoria gravitacional.

Galileu Galilei (1564-1642) nasceu em Pisa, mas ainda jovem se transferiu para Florença. Ele estudou o movimento dos corpos na superfície da Terra, procurando estabelecer uma nova física para seus movimentos. Adepto ao sistema heliocêntrico, não tardou a provocar controvérsias ao se opor aos princípios aristotélicos que admitiam formas perfeitas para os corpos celestes.

Oficialmente, Galileu foi o primeiro a utilizar o telescópio como instrumento de pesquisa. Isto ocorreu em 1609. Observou a Lua, o Sol, os planetas e a Via Láctea. Sua observação mais contundente pode ter sido a dos quatro maiores satélites de Júpiter – Io, Europa, Ganimedes e Calisto, hoje referidos como “satélites galileanos”. Esses satélites orbitam Júpiter, de maneira semelhante aos planetas que orbitam o Sol.

Com seus experimentos Galileu compreendeu o fenômeno da resistência dos corpos de modificarem seu estado dinâmico, ou seja, a inércia. Ele formalizou este fenômeno como princípio da inércia: “se um corpo se deslocar em linha reta com certa velocidade, ele continuará indefinidamente em movimento na mesma direção e com a mesma velocidade, se nenhuma força agir sobre ele”. Este princípio contrariava frontalmente a ideia de Aristóteles segundo a qual o corpo terminaria por ficar em repouso. Isaac Newton completou o trabalho de Galileu e abriu verdadeiramente o caminho para a ciência moderna.

As pesquisas de Galileu sobre o movimento dos corpos contribuíram significativamente para o desenvolvimento da mecânica planetária. Sabia-se que os planetas tinham órbitas elípticas, portanto órbitas fechadas, mas não se sabia a razão disso.

Isaac Newton nasceu na Inglaterra em 1642, ano em que Galileu morreu, e viveu até 1727. Ele é considerado um dos maiores físicos de toda a história. Estudou profundamente o movimento dos corpos. Para tanto, ele criou duas ferramentas matemáticas apropriadas: o cálculo diferencial e o cálculo integral. Suas três leis são as seguintes:

Primeira Lei (da inércia): “Na ausência de influência externa (força), um corpo em repouso permanece em repouso, enquanto um corpo em movimento continua a mover-se com velocidade constante e em linha reta (movimento retilíneo uniforme)”.

Segunda Lei: "A força total sobre um corpo é dada pelo produto da sua massa pela aceleração a que está submetido ($F = m \times a$)".

Terceira Lei (da ação e reação): "Para toda força que atua sobre um corpo existe outra de reação, de mesma intensidade, atuando na mesma direção, mas em sentido oposto".

Onde está a essência da mecânica newtoniana relativamente às órbitas planetárias? O grande avanço veio quando Newton interpretou a órbita fechada de um planeta como decorrência de uma força que atuava sobre o planeta e era dirigida para dentro da órbita, mais precisamente dirigida para o Sol. Isto significa que o planeta está sempre submetido a uma aceleração. A existência de uma força lateral altera a direção do movimento. Na ausência de força lateral, a trajetória deveria ser uma reta. Quando a força lateral atua, tudo se passa como se o planeta "caísse" sempre na direção do Sol ao mesmo tempo em que se desloca. Assim, ele acaba descrevendo uma órbita fechada. Essa força lateral é a força de atração gravitacional do Sol sobre o planeta.

A partir das três leis de Kepler e de suas três leis de dinâmica, Newton chegou à Lei Universal de Gravitação: a força de atração gravitacional entre dois corpos é diretamente proporcional ao produto de suas massas, e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa.

$$F = G \frac{(M \times m)}{d^2} \quad (2)$$

sendo G a constante universal de gravitação ($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$), d a distância e os corpos e M e m suas massas.

Pela teoria de gravitação de Newton, todas as leis de Kepler podem ser deduzidas. Além disso, ela nos demonstra que a constante de proporcionalidade na terceira lei (K) não é exatamente a mesma para os planetas porque não depende apenas da massa do Sol, mas da massa do planeta também. Seu valor correto é:

$$\cancel{K = G \frac{(M+m)}{4\pi^2}} \quad \text{Equação correta: } K = 4\pi^2 / G(M+m) \quad (3)$$

Como a massa do planeta (m) é sempre muito menor que a do Sol (M), Kepler não percebeu essa diferença em seus cálculos.

Planeta	Massa ($M_{\text{A}} = 6 \times 10^{21}$ ton)	Diâmetro ($D_{\text{A}} = 12.756$ km)	Densidade média (g/cm ³)	Velocidade de escape (km/s)
Terra*	1	1	5,5	11,2
Júpiter	318	11,2	1,33	61
Saturno	95	9,4	0,7	36
Urano	14,6	4	1,3	21
Netuno	17,2	3,9	1,76	24

* A Terra foi inserida apenas para comparação. M_{A} e D_{A} são, respectivamente, massa e diâmetro da Terra. Densidade média é "massa/volume". Velocidade de escape é a velocidade mínima necessária para vencer o campo gravitacional do planeta. Uma partícula lançada com essa velocidade entra em órbita em torno do planeta.

Planeta	H ₂	He	CH ₄	NH ₃	HD	C ₂ H ₆	H ₂ O
Júpiter	89.8	10.2	0.3	0.026	0.0028	0.00058	0.0004
Saturno	96.3	3.25	0.45	0.0125	0.011	0.0007	
Urano	82.5	15.2	2.3		0.0148		
Netuno	80.0	19.0	1.5		0.0192	0.00015	

* H₂: hidrogênio, He: hélio, CH₄: metano, NH₃: amônia, HD: hidrogênio-deutério, C₂H₆: etano, H₂O: água

Tabela 2- Valores médios dos principais componentes químicos dos planetas gasosos (adaptado de <http://filer.case.edu/~sjr16/advanced/index.html>).

5.1.3 O QUE SÃO SISTEMAS PLANETÁRIOS?

Até o final do século 17, a existência de planetas orbitando estrelas era apenas uma hipótese, mais filosófica que científica, pois não havia comprovação observacional. Este assunto passou a ser tratado com mais rigor por Christian Huygens (1629-1695), que passou longos anos procurando sistematicamente planetas extrassolares. Nada foi encontrado. Quase dois séculos depois, mais precisamente em 1916, o astrônomo americano Edward Emerson Barnard comunica a descoberta uma estrela na constelação do Ofiúco que parecia bambolear em torno de sua posição. A discussão sobre a possibilidade de essa oscilação ser causada por planetas em torno da "estrela de Barnard" perdurou por décadas e nada foi comprovado. Somente em 1995 é que foi logrado sucesso na procura por planetas orbitando outras estrelas: a estrela 51 Pégaso tinha um planeta.

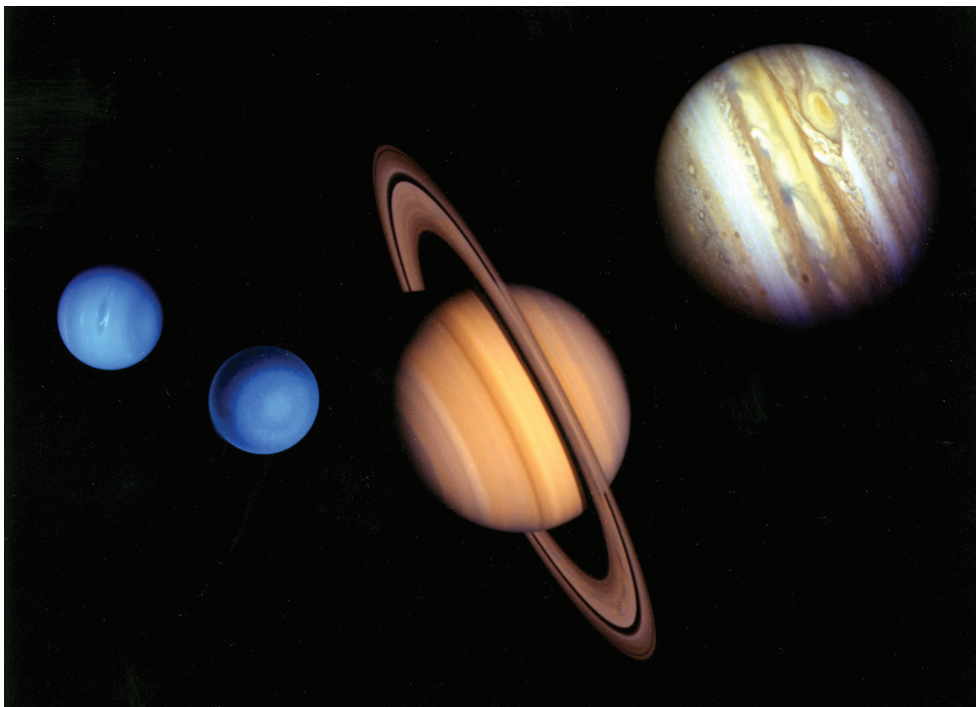
Desde então, a quantidade de planetas orbitando estrelas têm aumentado sistematicamente. Esses planetas fazem parte de conjuntos de corpos de diferentes tamanhos que circundam as estrelas. Não visualizamos os demais corpos porque ainda não dispomos de instrumentação adequada para fazê-lo.

Levando em consideração o conhecimento teórico sobre formação de estrelas e as atuais observações, podemos definir um sistema planetário como sendo o conjunto de objetos não estelares que orbitam uma ou mais estrelas, tal como planetas, satélites, asteroides, cometas fragmentos menores, além de gás. Esses sistemas surgem durante os estágios de formação estelar, por isso o Universo deve estar repleto de planetas.

5.1.4 O QUE É SISTEMA SOLAR?

Sistema Solar é o sistema planetário da nossa estrela, o Sol. Como só há uma única estrela com esse nome não tem sentido falar em outros sistemas solares, nem em planetas de outros sistemas solares.

Os corpos desse sistema se agregam ao Sol pela ação da força gravitacional. Como veremos adiante, esse conjunto é formado por corpos diferentes em tamanho, composição química, distância etc. A região limítrofe do Sistema Solar é a esférica Nuvem de Oort, cujo raio atinge quase um terço da distância do Sol à estrela mais próxima (Próxima do Centauro).



2- Montagem de imagens dos planetas gasosos, obtidas pela sonda espacial Voyager 2 nos anos de 1980. Da esquerda para a direita, vemos Netuno, Urano, Saturno e Júpiter (NASA/JPL).

5.2 OS PLANETAS GASOSOS DO SISTEMA SOLAR

5.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Gás é um estado possível para a matéria. Quando concentrado em grandes massas, como planetas e estrelas, os gases adquirem forma próxima da esférica por consequência da força gravitacional. Uma característica marcante de um corpo feito essencialmente de gás é sua baixa densidade. No Sistema Solar, apenas o Sol e os maiores planetas são predominantemente gasosos.

Embora os planetas gasosos possam abrigar um núcleo com dimensões e características de um planeta rochoso, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno são muito diferentes dos planetas rochosos. Estes planetas são enormes esferas de gás comprimido a diferentes pressões. As massas são elevadas assim como os volumes, o que lhes conferem baixas densidades. Eles não possuem superfícies sólidas como os planetas rochosos, mas podem apresentar uma camada de gás liquefeito.

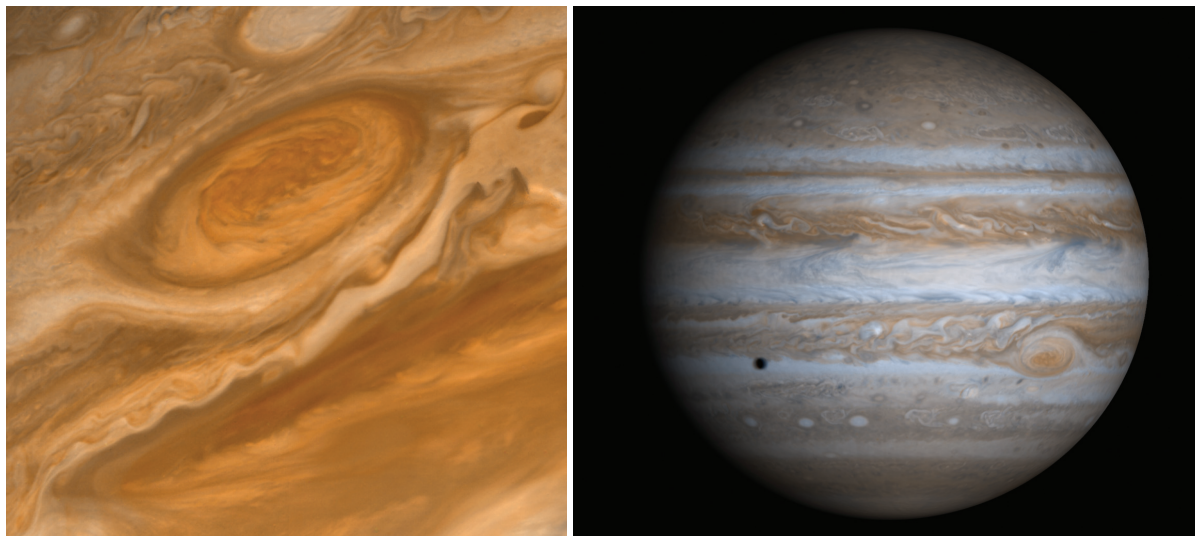
Júpiter e Saturno são formados principalmente por hidrogênio e hélio, enquanto que Urano e Netuno possuem de 10 a 20% menos destes elementos. A tabela 2 apresenta alguns dados físicos desses planetas, com valores comparativos aos terrestres.

As atmosferas dos gasosos são marcadas por estruturas complexas e ventos que se deslocam em cinturões paralelos ao equador e com velocidade que depende da latitude local, por vezes em sentidos opostos.

5.2.3 ATMOSFERA E ESTRUTURA DOS PLANETAS GASOSOS

• Júpiter

Júpiter agrega mais massa que todos os demais planetas, satélites, asteroides e cometas juntos. Depois da Lua e de Vênus, Júpiter é o astro mais brilhante do céu noturno. Seu volume equivale a 1.400 vezes o da Terra e sua densidade (massa/volume) é apenas um quarto da terrestre. Isto indica que o



3- Júpiter visto pela sonda Cassini em 2000 [NASA/JPL/University of Arizona] (esquerda). Detalhe da grande mancha vermelha, fotografada pela sonda Voyager 2 em 1996 [NASA/JPL] (direita).

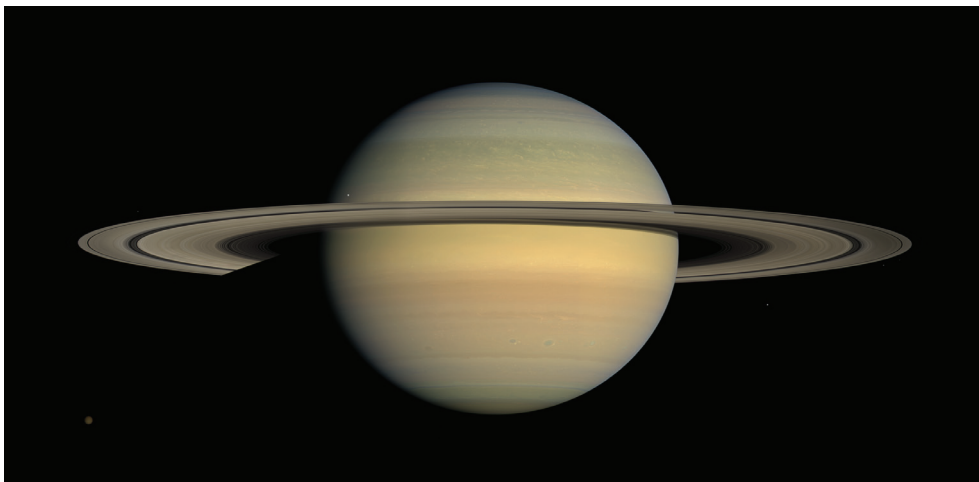
planeta gigante é constituído essencialmente de gases, que são bem menos densos que as rochas e os metais que predominam nos planetas rochosos.

Júpiter completa uma volta em torno do Sol a cada 11,9 anos, porém gira sobre seu eixo em apenas 9 horas e 54 minutos. Sua rápida rotação causa achatamento nos polos e alongamento no equador. Júpiter irradia o dobro da energia que recebe do Sol. Pela distância que se encontra do Sol, a temperatura média de Júpiter deveria ser aproximadamente 100 K (-173 °C), não 160 K. Isto indica a existência de uma fonte de calor em Júpiter. Esse calor extra é gerado por lenta contração gravitacional, que comprime o planeta alguns milímetros por ano e libera energia.

Júpiter só foi conhecido em maior profundidade na era espacial, com as sondas americanas Voyagers 1 e 2 (1977) e Galileo (1995). Até então, as informações principais vieram de trabalhos espectroscópicos, isto é, da análise do espectro de sua luz obtido em solo. Juntamente com observações visuais, os dados espectroscópicos mostram que Júpiter tem uma atmosfera complexa, dominada por cinturões paralelos ao seu equador por onde circulavam gases atmosféricos com velocidades típicas das zonas, que podem chegar a 650 km/h. Tempestades ciclônicas, decorrentes de zonas de baixa pressão são comuns na atmosfera joviana. Embora relâmpagos na alta atmosfera sejam menos frequentes que na Terra, eles são bem mais energéticos que os terrestres.

A alta atmosfera joviana é composta essencialmente de gás hidrogênio (H_2), cerca de 80% segundo a sonda Galileo. O restante é praticamente hélio (He). Esta composição química é a mesma do Sol e praticamente a predominante no Universo. Isto significa que este planeta tem a mesma composição química da nuvem primordial que deu origem ao Sistema Solar, há 4,6 bilhões de anos. Sua baixa densidade, $1,33 \text{ g/cm}^3$, revela que esta composição química ainda predomina em seu interior. Compostos químicos contendo hidrogênio, como metano (CH_4), amônia (NH_3) e água (H_2O), predominam entre as espécies atmosféricas mais densas.

Suas camadas externas são compostas de amônia congelada, hidrosulfeto de amônia, água congelada e gases de hidrogênio, hélio, metano, amônia e água. A amônia congelada é a responsável pelas nuvens esbranquiçadas do tipo cirrus. Na presença de outros componentes, o hidrosulfeto de amônia forma as nuvens coloridas que caracterizam a atmosfera joviana. A temperatura destas nuvens na alta atmosfera é da ordem de -50°C e a pressão é o dobro da terrestre no nível do mar.



4- Saturno fotografado pela sonda Cassini em 2008 (NASA/JPL/Space Science Institute).

Uma figura atmosférica típica de Júpiter é a Grande Mancha Vermelha localizada no hemisfério sul do planeta, provavelmente descoberta por Giovanni Cassini no final do século 17. Trata-se de uma tempestade anticiclônica (de alta pressão) semelhante àquelas que ocorrem na Terra, mas muitíssimo maior e mais intensa. O tamanho desse anticiclone é cerca de três vezes maior que o da Terra. Essa tempestade gira em sentido anti-horário, com período de seis dias, e profundidade de centenas de quilômetros. Na Terra um anticiclone do hemisfério sul gira no sentido horário e é causado por zona de baixa pressão. As zonas esbranquiçadas são nuvens mais frias e as de cor amarronzada são mais quentes.

Nas partes mais internas, onde pressão e temperatura aumentam gradativamente, o hidrogênio torna-se líquido. A 20.000 km de profundidade a temperatura sobe para 10.000 K e a pressão chega a 300 mil atmosferas. Nestas condições, o hidrogênio líquido torna-se condutor de eletricidade, como os metais, por isso ele é classificado como hidrogênio líquido metálico. É nesta camada condutora que se origina o poderoso campo magnético de Júpiter. Os polos magnéticos de Júpiter são invertidos em relação aos polos terrestres.

É possível que o centro de Júpiter seja composto de material rochoso e metais, algo equivalente a um planeta rochoso com massa dez a quinze vezes superior a terrestre. Mas, pelas condições extremas de pressão e temperatura (30.000 °C), pode ser que o núcleo joviano seja líquido ou altamente viscoso.

• Saturno

Embora Saturno sempre tenha sido conhecido pela humanidade, seus anéis só foram percebidos após o surgimento do telescópio no século 17. Este planeta completa uma volta em torno do Sol em 29,5 anos, mas gira sobre seu eixo em 10 horas e 39 minutos, um pouco mais lento que Júpiter. Devido à sua rápida rotação ele também é achatado nos polos e alongado no equador.

Assim como Júpiter, Saturno irradia mais energia do que recebe do Sol. Sua temperatura média é, aproximadamente, 130 K. Pela distância em que se encontra do Sol deveria ser apenas 80 K. No caso de Saturno, o calor produzindo localmente provém da lenta separação de gases: os gases mais densos afundam lentamente para o interior e os mais leves flutuam para cima. O atrito entre as moléculas aquece o gás do meio, liberando calor.

Planeta	Gravidade (relativa)*	Pressão Interna (atmosfera)	Pressão Interna (relativa)*	Temperatura (°C)	Temperatura (relativa)*
Mercúrio	0,38	400.000	0,11	2.200	0,34
Vênus	0,9	2.900.000	0,81	5.550	0,84
Terra	1	3.600.000	1	6.650	1
Marte	0,38	400.000	0,11	2.760-3.870	0,42-0,58
Júpiter	2,52	(50 a 100).000.000	15 to 30	27.800	4,18
Saturno	1,06	(5 a 8).000.000	1,5 to 2,5	13.900-19.500	2,09-2,93
Urano	0,92	(4 a 5,5).000.000	1,1 to 1,5	8.350	1,26
Netuno	1,19	(5,5 a 7).000.000	1,5 to 2	8.350	1,26

*Valores relativos aos terrestres

Tabela 3- Valores teóricos de pressão e temperatura dos núcleos dos planetas (adaptado de <http://cseligman.com/text/tableofcontents.htm>).

Sendo o segundo maior planeta, ele tem a segunda maior família de satélites. Suas propriedades gerais e sua estrutura interna são parecidas com as de Júpiter. Ele está quase duas vezes mais distante do Sol que Júpiter, por isso sua temperatura nas partes mais externas é menor.

A atmosfera saturnina é tão complexa quanto a joviana, com faixas de circulação paralelas e distribuídas em latitude, jatos, zonas de alta e baixa pressão e manchas. Hidrogênio e hélio são os constituintes majoritários da atmosfera de Saturno. Descargas elétricas (relâmpagos) e calor interno forçam a mistura química da atmosfera. No topo da atmosfera a amônia (NH_3) congelada é abundante. Saturno apresenta duas manchas pequenas no hemisfério sul, nada de parecido com a Grande Mancha Vermelha de Júpiter. Em compensação, ele apresenta manchas de formato hexagonal nas proximidades do polo norte bem mais quentes que as regiões vizinhas e tão quentes quanto aquelas presentes na região equatorial. Não há nada no polo sul que se assemelhe a isso. Júpiter e Terra não apresentam fenômeno parecido.

O gás hidrogênio (H_2) está presente até a profundidade de 30.000 km, quando fica submetido à temperatura de 8.000 K e pressão aproximada de 300 mil atmosferas. Abaixo dessa região prevalece um envelope de hidrogênio líquido metálico semelhante ao de Júpiter, mas de menor proporção. O campo magnético do planeta é gerado por correntes elétricas que circulam nesta região.

Saturno deve ter um núcleo rochoso rico em metais, possivelmente maior que o de Júpiter. Acredita-se que quanto mais rápido se forma um planeta gigante, menor é seu núcleo rochoso. Entre o núcleo e a camada de hidrogênio líquido metálico há um manto composto de amônia, água e metano sob alta pressão e elevada temperatura.

• Urano

Acidentalmente, William Herschel descobriu Urano em 1781. Foi o primeiro planeta a ser descoberto com telescópio. Urano completa uma volta em torno do Sol em aproximadamente 84 anos. Um dia local dura 17 horas e 15 minutos. Seu eixo de rotação está tombado em 98° em relação à vertical do plano de sua órbita, ou seja, o eixo é quase paralelo ao plano orbital. É caso único entre os planetas. Como o eixo de rotação ultrapassou 90° , sua rotação é retrógrada. O tombamento provoca um ciclo sazonal único. Durante os solstícios um dos polos fica voltado para o Sol (verão) enquanto o outro permanece na escuridão (inverno). A alternância das estações nos polos ocorre a cada 41 anos.



5- Urano fotografado pela sonda Voyager 2 em 1986 (NASA/JPL).

Nos equinócios o equador permanece voltado para o Sol. As estações sazonais mudam a cada 21 anos. As consequências desse ciclo sazonal ainda não são bem conhecidas, pois o planeta está muito distante e os ciclos demoram muito para mudar.

A razão do tombamento de Urano não é conhecida, porém a tese mais aceita é que ela tenha sido provocada por colisão com outro corpo, tão intensa que tombou o planeta.

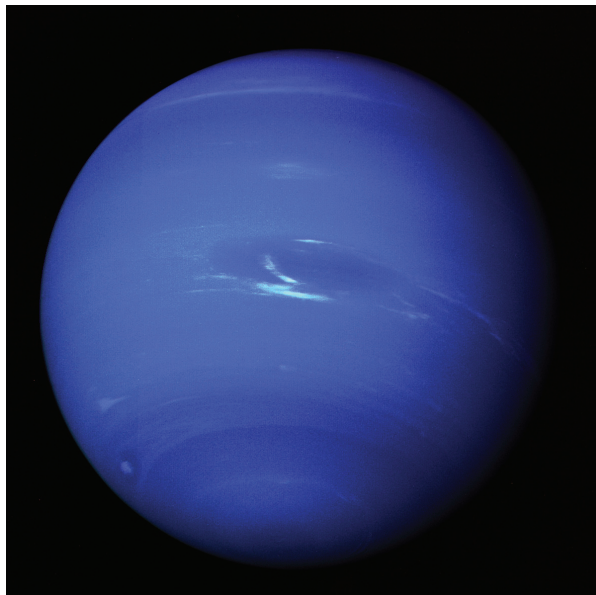
A atmosfera de Urano é composta aproximadamente de 83% de hidrogênio, 15% de hélio, 2% de metano e traços de etano, acetileno e outros hidrocarbonetos (compostos baseados em hidrogênio e carbono). O metano da alta atmosfera absorve preferencialmente luz avermelhada, por isso o planeta tem a cor azul-esverdeada (ciano). As nuvens devem ser compostas principalmente por metano congelado a -220°C .

Ele também apresenta cinturões de circulação atmosférica. Em latitudes médias, nas proximidades do equador, os ventos se movem na mesma direção de rotação do planeta a velocidade entre 140 e 580 km/h.

Comparado à Terra, Urano é 14,5 vezes mais massivo, 67 vezes mais volumoso e sua gravidade é 1,17 vezes mais intensa. Sua densidade, $1,27\text{ g/cm}^3$, sugere que o planeta seja formado essencialmente de gases congelados como amônia, metano e água. A massa total desse "gelo" presente no interior de Urano ainda é uma incógnita, mas pode ser em torno de 11,4 vezes maior que a massa terrestre. Calcula-se que a massa de hidrogênio e hélio seja equivalente à massa da Terra e, o restante, 2,1 massas terrestres, seja material rochoso. Sua estrutura interna é composta, provavelmente, de um núcleo rochoso, um manto de gelo e um envelope gasoso de hidrogênio e hélio. A densidade do núcleo deve ser de aproximadamente 9 g/cm^3 , a pressão pode atingir seis milhões de atmosferas e a temperatura pode chegar a 5.000 K. Pelas condições de pressão e temperatura a que está submetido, o manto congelado não é frio e sólido como o gelo, mas quente, denso, fluido e altamente condutor de eletricidade. É possível que o magnetismo de Urano seja causado por movimentos convectivos deste material.

• Netuno

Se a descoberta de Urano ocorreu graças ao telescópio, a de Netuno deve-se à vitória do cálculo matemático. Após ter sido identificado como planeta, Urano passou a ser observado por décadas e sua órbita recalculada com as Leis de Newton, em função das posições determinadas.



6- Netuno fotografado pela sonda Voyager 2, em 1998 (NASA/JPL).

Esta vigília acabou mostrando irregularidades na órbita do planeta, incompatíveis com as previsões teóricas. Em 1840, Friedrich W. Bessel sugeriu a existência de outro planeta como causa das perturbações orbitais de Urano. Em 1846, John Couch Adams e Urbain Leverrier apresentaram cálculos orbitais mais refinados que permitiram sua descoberta por Johann G. Galle.

A massa de Netuno é aproximadamente 17 vezes maior que a massa terrestre. Seu diâmetro no equador é quase quatro vezes maior que o da Terra, e ele é quase esférico. Ele demora quase 165 anos para dar uma volta completa em torno do Sol, e o dia local dura cerca de 16 horas e 6,5 minutos. A inclinação de seu eixo de rotação (28°) é quase igual à da Terra, assim no ciclo sazonal de Netuno os hemisférios ficam submetidos a épocas de verão e inverno. A diferença marcante é que no caso de Netuno as estações duram 41 anos cada.

Netuno se parece muito com Urano. Sua atmosfera é composta de hidrogênio, hélio, metano e amônia, porém é mais estruturada. Redemoinhos e cirrus de elevada altitude são figuras atmosféricas comuns. Assim como Urano, sua cor azulada deve-se à absorção seletiva de luz vermelha pelo metano, mas as causas exatas da diferença marcante de cor entre os dois planetas ainda é desconhecida.

Assim como os demais planetas gasosos, Netuno também apresenta bandas de circulação atmosférica distribuídas em latitudes. O planeta apresenta as maiores velocidades de circulação atmosférica do Sistema Solar, ventos movendo-se a 2.400 km/h. Algumas tempestades podem durar longos períodos.

Uma figura característica de Netuno é a Grande Mancha Escura, semelhante à Grande Mancha Vermelha de Júpiter. Trata-se de uma tempestade anticiclônica (centros de alta pressão que giram em sentido horário nos topos das nuvens) de forma ovalada com 13.000 km $\times$ 6.600 km, porém não estável como a mancha joviana. Ela e outra menor mais ao sul foram descobertas em 1989 pela sonda Voyager 2, no hemisfério sul do planeta e desapareceram cinco anos mais tarde. Em novembro de 1994, com a ajuda do telescópio espacial Hubble, foi descoberta outra mancha, desta vez no hemisfério norte. As razões dessas alterações são desconhecidas.

A atmosfera é composta de hidrogênio, hélio e metano (em menor proporção), concentra até 10 % da massa do planeta e tem no máximo 5.000 km de espessura. Na base da atmosfera, a pressão atinge aproximadamente 90.000 atm. Mais abaixo a matéria vai se transformando em um manto líquido superaquecido como o de Urano, feito essencialmente de água, amônia e metano, e com temperatu-

ras variando entre 2.000 K e 5.000 K. A massa contida no manto pode representar de 60% a 85% do total. O núcleo, que ocupa a região abaixo do manto, deve ser composto de material rochoso e metais, provavelmente no estado líquido. Sua massa não deve ultrapassar 10% da massa de Netuno. As condições são aquelas indicadas na tabela 3.

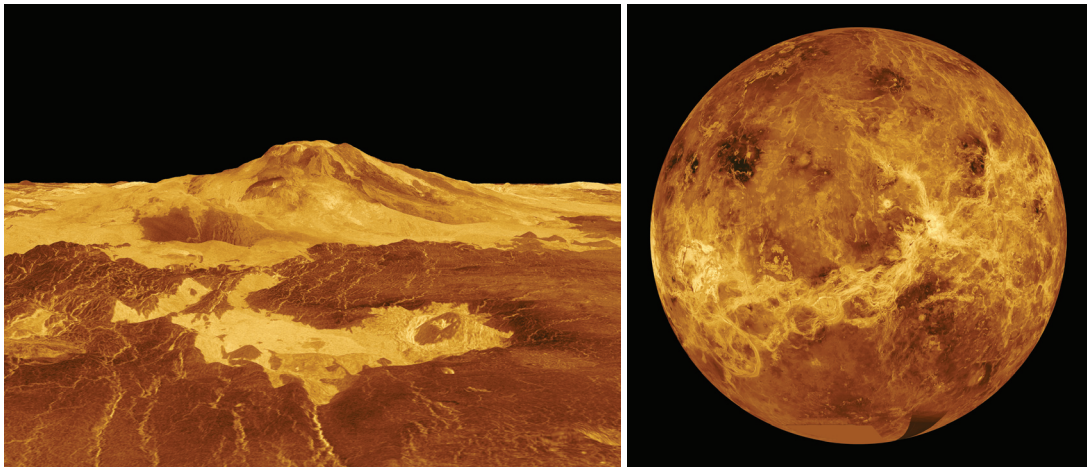
5.3 PLANETAS ROCHOSOS DO SISTEMA SOLAR

Mercúrio, Vênus, Terra e Marte são planetas rochosos, também conhecidos por planetas terrestres ou planetas telúricos. Dentre eles, a Terra é o que conhecemos melhor. Não dispomos de amostras de solo dos demais planetas, tampouco fizemos prospecção profunda em seus terrenos. A superfície extraterrestre mais explorada é a marciana. Sondas espaciais orbitam Marte há décadas, mapeando toda a sua superfície. As sondas robotizadas americanas Spirit e Opportunity exploram o solo marciano desde 2004.

As condições ambientais dos quatro planetas rochosos são bem diferentes, assim como as figuras superficiais, mas a estrutura básica apresenta similaridades. As semelhanças de tamanho, massa e posição fazem de Vênus e Terra uma espécie planetas gêmeos. No entanto, pelo fato de estar um pouco mais próxima do Sol, Vênus teve um destino bem diferente da Terra.

Amostras de rochas lunares e de meteoritos, que são fragmentos de asteroides, de Marte e da própria Lua, são as únicas espécies que dispomos para análise em laboratório. Uma parte dessas rochas vem da superfície, outras, como os meteoritos diferenciados ou metálicos, vêm de partes mais profundas de corpos que se desintegraram em colisões catastróficas. A prospecção de regiões profundas não pode ser feita diretamente. No caso da Terra, o detalhamento da estrutura interna se faz por modelos teóricos baseados em dados sísmicos. Informação parcial sobre a composição química do manto terrestre provém das análises das lavas, mas para os demais planetas rochosos essa informação ainda é teórica.

Como os demais planetas são menores que a Terra, em massa, diâmetro e gravidade, as camadas internas estão submetidas às pressões menores que no caso terrestre. Logo, as mudanças nas condições físicas e químicas do material nesses planetas são encontradas em profundidades maiores que aquelas especificadas para a Terra.



7- Images da superfície de Vênus sintetizada com dados de radar da sonda Magalhães. [esquerda] Visão global. [direita] O Monte Maat (visto ao fundo) é o vulcão extinto mais alto do planeta. O cume está 5 km acima do terreno vizinho, parcialmente conberto de lava solidificada (NASA/JPL).

• Vênus

A gravidade em Vênus equivale, aproximadamente, a 90% da terrestre. Por conta disto, as rochas de baixa densidade do manto superior são ligeiramente mais abundantes que na Terra. Pela mesma razão, as rochas mais densas do baixo manto são ligeiramente menos abundantes que no caso terrestre.

Comparativamente à Terra, Vênus tem 81% de sua massa e 86% do seu volume, o que lhe confere uma densidade equivalente a 95% da terrestre. A pressão central (no núcleo) deve ser algo em torno de 80% da terrestre, mas o interior do planeta deve estar estruturado de forma semelhante à encontrada na Terra. As previsões teóricas sugerem que o núcleo venusiano deva ter 45% do tamanho do planeta, contra 55% no nosso planeta.

A superfície de Vênus é um ambiente extremamente hostil. Uma sonda de prospecção de solo em Vênus terá de resistir uma pressão atmosférica 90 atm e temperatura próxima de 480 °C. Antes do pouso, deverá sobreviver à passagem por camada atmosférica rica em ácido sulfúrico. Algumas sondas russas do programa Venera pousaram no solo de Vênus, mas funcionaram por pouco tempo. Elas nos forneceram os únicos dados coletados *in loco*. Por isso, nosso conhecimento sobre a superfície venusiana vem de sondas orbitais que utilizam radares, pois sua atmosfera espessa impede a observação direta do solo. Na década de 1990 a sonda americana Magalhães orbitou o planeta por quatro anos, produzindo o maior acervo de dados venusianos. Atualmente, a sonda europeia Expresso Vênus está completando esse acervo com informações inéditas.

A superfície de Vênus é praticamente plana e lisa. Figuras geológicas como "canyons" (garganta sinuosa e profunda, na Terra cavada por curso d'água), vulcões, fluxos de lava, fissuras, montanhas e crateras, existem, mas são proporcionalmente mais escassas. Existem evidências de atividade tectônica, porém a superfície parece ser uma placa litosférica única com pouca evidência de movimento horizontal de grande escala como os encontrados na Terra.

A maior parte da superfície de Vênus é relativamente nova, não deve ter mais que 500 milhões de anos. A causa pode ter sido um período de intenso vulcanismo, com lavas recobrimdo todo o planeta e ocultando acidentes de terrenos antigos. Mesmo assim, crateras de impacto marcam a superfície venusiana. Elas devem ter no máximo a idade do terreno jovem. Vênus tem poucas crateras pequenas. Isto pode significar que corpos de pequenas dimensões sejam vaporizados ou destruídos durante a passagem pela densa atmosfera venusiana. Muitas crateras apresentam halos claros ou escuros, e

depósitos de escoamento que se estendem a grandes distâncias e são muito brilhantes quando vistos por radar. A cratera Mead é multianelada e tem 250 km de diâmetro.

Vênus apresenta dois apenas dois continentes: Ishtar Terra e Afrodite Terra. Ishtar está localizada nas imediações do polo norte e tem o tamanho aproximado da Austrália. Nela há um planalto (Lakshmi) com cerca de 1.500 km no seu lado mais largo. Ali se encontra a maior montanha venusiana, o Monte Maxwell, com 11 km de altura. Afrodite está na região equatorial e tem tamanho equivalente ao da África.

A atmosfera de Vênus é sem dúvida sua característica mais marcante. Ela é composta essencialmente de dióxido de carbono (96%), nitrogênio (3%) e outros gases (1%). A pressão na superfície é 90 vezes maior que a terrestre no nível do mar. O dióxido de carbono é extremamente eficiente na retenção de calor, por isso provoca um efeito estufa de 285 °C e eleva a temperatura superficial a 470 °C, excedendo até mesmo a temperatura de Mercúrio, o planeta mais próximo do Sol.

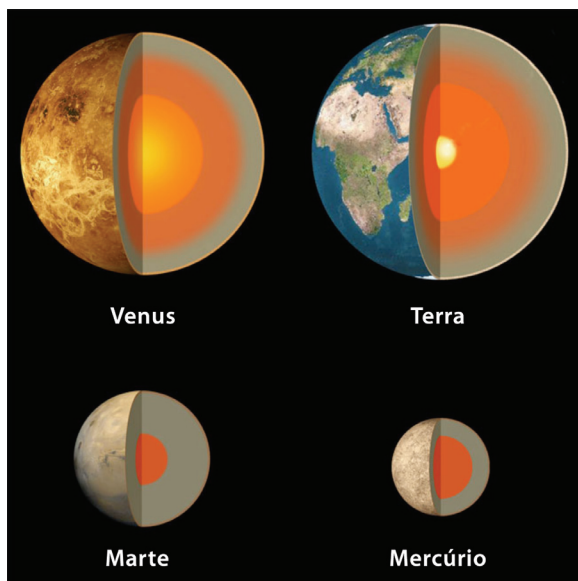
Por estar mais próximo do Sol, Vênus recebe 89% mais luz solar que a Terra, mas apenas 20% dessa luz penetra a atmosfera e chega ao solo. O restante é refletido de volta ao espaço pela densa atmosfera venusiana. Praticamente não há variação diurna de temperatura, nem diferença significativa de temperatura entre as regiões polares e a equatorial.

Até cerca de 50 km de altura da superfície, a atmosfera parece não conter nuvens e os ventos são fraquíssimos. É uma estufa. Acima deste patamar, as nuvens são densas, parte delas é formada de ácido sulfúrico e outros compostos corrosivos, e praticamente livres de água. Os ventos da alta atmosfera são velocíssimos, podem atingir 400 km/h.

• Mercúrio e Marte

Comparativamente a Vênus e Terra, estes planetas têm massas bem menores, são menos volumosos e suas estruturas internas são relativamente diferentes.

O diâmetro de Marte é aproximadamente metade do diâmetro da Terra, e seu volume representa cerca de 15% do terrestre. Ele é menor e menos maciço que o núcleo da Terra. A gravidade em sua superfície é 2,5 vezes menor que a terrestre no nível do mar, por isso as figuras de relevo são relativamente mais elevadas que as da Terra ou mesmo de Vênus. Se fosse uma cópia da Terra em menor escala, Marte não teria manto inferior. As rochas do manto marciano seriam



8- Estrutura interna dos planetas rochosos. Proporcionalmente ao tamanho do planeta, podemos dizer os núcleos de Vênus e Terra são similares, o núcleo de Mercúrio é bem maior e o de Marte é bem menor. Em valores absolutos, o núcleo da Terra concentra mais massa que os planetas Marte e Mercúrio juntos (imagem: NASA).

semelhantes às rochas do manto superior terrestre, ou seja, Marte deveria ser cerca de 80% menos denso que a Terra.

Para Mercúrio, a situação é ainda mais extrema. Com apenas 6% do volume da Terra, a densidade de Mercúrio seria ainda menor que a de Marte, se ele também fosse uma versão miniaturizada da Terra.

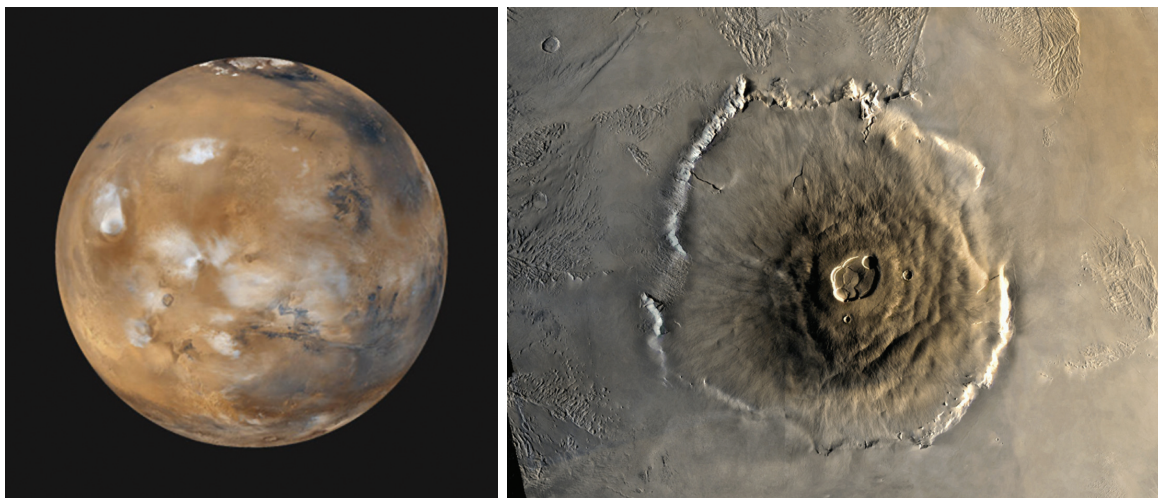
Proporcionalmente à Terra, Mercúrio é 25% mais denso e Marte 20% menos denso. Suas densidades, no entanto, são maiores que as densidades das rochas superficiais da Terra e da Lua. Conclui-se, portanto, que esses planetas têm materiais tão pesados quanto alguns dos encontrados no interior do nosso planeta.

O núcleo denso de Mercúrio deve ser metálico. Em proporção ao planeta, pode-se dizer que é volumoso e bastante maciço. Marte, ao contrário, apresenta um núcleo relativamente pequeno e pouco maciço. Enquanto o raio do núcleo terrestre corresponde a metade do raio do nosso planeta, Marte pode ter um núcleo com raio correspondente a um terço do raio do planeta e o raio do núcleo de Mercúrio pode chegar a três quartos do raio do planeta. Em síntese, podemos dizer que, proporcionalmente, Terra e Vênus têm núcleo de tamanhos médios, Marte tem núcleo menor e Mercúrio tem núcleo maior. A massa do núcleo terrestre é quase o dobro da soma das massas de Marte e Mercúrio.

As figuras de superfície de um planeta é o resultado de numerosos agentes de origem interna e externa. Os primeiros estão relacionados com fenômenos sísmicos, que causam os terremotos, vulcanismo e movimentação crosta. Os agentes externos estão relacionados com a influência atmosférica, a presença de líquidos e crateras de impacto. No caso terrestre há, ainda, a influência da biosfera. Excetuando as crateras de impacto, os demais fenômenos mantêm algum tipo de relação e em conjunto destroem e recriam parte da superfície, eliminando quase todos os vestígios da história geológica primitiva do planeta.

Terrenos: Marte já teve água líquida na superfície, porém agora é um planeta árido. A água que restou está congelada nas capas polares e no subsolo. Há marcas enormes de erosão fluvial ocorrida no passado. Os hemisférios norte e sul marcianos são distintos.

O hemisfério norte é plano e coberto por material basáltico, um indicativo de que a atividade vulcânica praticamente se restringiu a este hemisfério. Trata-se, portanto, de uma superfície jovem. Em relação à altitude média, os terrenos deste hemisfério são mais baixos. Também é neste hemisfério que está



9- Marte fotografado em 1999 pela sonda Mars Global Surveyor. As nuvens esbranquiçadas e gelo de água são vista sobre a região de Tharsis, onde se localizam os maiores vulcões extintos [NASA/JPL/Malin Space Science Systems] (esquerda). Monte Olimpo é o maior vulcão (extinto) do Sistema Solar. Tem 600 km de base e 27 km de altura e localiza-se à noroeste de Tharsis [Sonda Viking 1, 1978; NASA/JPL] (direita).

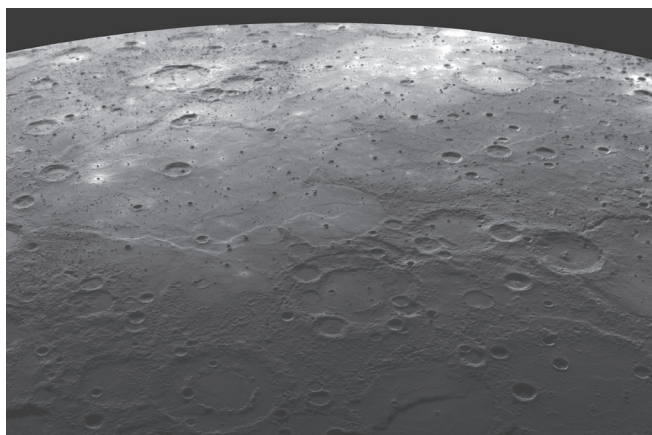
localizado o maior vulcão extinto do Sistema Solar, o Monte Olimpo, com 600 km de base e 27 km de altura (três vezes a altura do Monte Everest). Os demais vulcões deste hemisfério também são grandes se comparados aos terrestres, porém menores que o Monte Olimpo. Em princípio, a baixa gravidade marciana propicia a formação de figuras geológicas mais elevadas que na Terra, mas não a ponto de explicar tais dimensões. A explicação mais plausível é a baixa atividade tectônica em Marte. Na Terra, as placas crustais movem-se sobre câmaras de rocha fundida localizadas abaixo da superfície. Assim, os vulcões ativos são deslocados de suas posições tornando-se inativos, enquanto outros vão surgindo na posição da fenda por onde escoa a lava. Isto acaba formando vulcões e ilhas vulcânicas alinhadas, como as ilhas havaianas. Em Marte isto não ocorreu, por isso os vulcões permaneceram sobre pontos quentes, mantendo sua atividade por longo tempo e adquirindo proporções imensas.

O terreno do hemisfério sul, ao contrário, é elevado, desnivelado e fortemente marcado por crateras de impacto. Portanto, trata-se de terreno antigo.

Canyons: são vales estreitos e profundos com lados escarpados, geralmente produzidos por água corrente. Na superfície marciana há muitos, mas o maior deles é o Valles Marineris, descobertos e estudados pelas sondas do programa espacial Mariner (NASA). Eles estão próximos à região equatorial e são, de fato, enormes: 5.000 km de extensão, 500 km de largura e 6 km de profundidade. Acredita-se que eles tenham sido formados por atividade tectônica, porém apresentam ainda evidência de erosão por fluido.

Erosão fluvial: há canais enormes que podem ter sido escarpados por água corrente. Nas condições atuais, pressão 90 vezes menor que a terrestre no nível do mar, a água não sobrevive no estado líquido, somente no estado sólido ou gasoso. Portanto, estas figuras de superfície, decorrentes de erosão fluvial, foram forjadas em passados distante, há cerca de 3,8 bilhões de anos, quando Marte possuía atmosfera densa e temperatura amena para ter parte de superfície coberta por água líquida. Muitos terrenos marcianos são parecidos com terrenos terrestres originados por erosão fluvial.

Erosão eólica: apesar de ser rarefeita e fina, a atmosfera marciana propicia a formação de ventos sazonais, relacionados com o aquecimento solar. Há fortes tempestades de areia e redemoinhos que erodem a superfície e criam dunas.



10- Limbo oeste de Mercúrio, fotografado pela sonda Messenger. O terreno plano é composto de lava solidificada, marcado por crateras de impacto (NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington).

Crateras de impacto: são depressões de tamanhos variados causadas por impacto de corpos que caem na superfície. Tamanho, profundidade e formato dependem da violência do impacto. Quanto maior for a massa do corpo atrator, maior será a velocidade de queda (e de impacto), mas as velocidades superam dezenas de milhares de quilômetros por hora. A quantidade de energia liberada no impacto é enorme, por isso causam grandes depressões e provocam fusão e metamorfismo das rochas locais. Assim como Mercúrio, Marte é rico em crateras de impacto, a maioria concentrada no hemisfério sul.

A superfície de Mercúrio é muito antiga (três a quatro bilhões de anos) e apresenta numerosas figuras superficiais como crateras, sulcos, e terrenos variados, alguns fortemente marcados por crateras de impacto, outros livres delas. Podemos distinguir três tipos de terrenos básicos: (a) planícies que lembram os mares lunares, (b) planícies intercrateras, (c) planaltos acidentados, irregulares, levemente parecidos com algumas regiões lunares.

Os diâmetros das crateras mercurianas variam entre 100 m e 1.300 km. As planícies são feitas de material fundido e solidificado, de diferentes idades. Os sulcos enrugados são evidências de resfriamento e consequente encolhimento da superfície, provocando o enrugamento. Base Caloris, uma cratera de impacto com bordos múltiplos, é a maior figura superficial. Ondas de choque produzidas durante o impacto se propagaram radialmente pela superfície e se encontraram no lado diametralmente oposto, enrugando o terreno local.

Essencialmente, a história geológica de Mercúrio é a seguinte: após sua formação, a massa do planeta foi diferenciada, isto é, separada em um núcleo grande e um manto fino. Lava do manto fluiu pelas rachaduras da superfície resfriada, formando os terrenos intercrateras. As superfícies mais antigas foram formadas há 4,2 bilhões de anos. A intensa maré solar produzida pela proximidade do Sol desacelerou a rotação do planeta, formando as escarpas e os penhascos que vemos hoje. Durante o período de intenso bombardeamento de pequenos corpos que predominou nos primórdios do Sistema Solar, o planeta foi atingido fortemente e parte de sua superfície ficou marcada por crateras de impacto. A cerca de 3,8 bilhões de anos, as planícies foram formadas por derramamento de lavas, possivelmente por vulcanismo induzido pelos violentos impactos. Por estar muito próximo do Sol e ser muito quente, Mercúrio não tem atmosfera, portanto não houve processo erosivo que desfigurasse as figuras de superfície ao longo do tempo.

5.4 OS PLANETAS-ANÕES

As variações observadas na órbita de Urano, em meados do século 19, só podiam ser explicadas pela presença de outro planeta em suas vizinhanças. Assim, foi descoberto Netuno, o primeiro planeta a ser previsto por teoria. Posteriormente, perturbações de menor ordem na órbita de Urano indicavam uma possível presença de outro corpo adiante de Netuno. O astrônomo americano Percival Lowell passou os últimos dez anos de sua vida procurando por esse objeto. Chegou até a registrá-lo em uma placa fotográfica, mas não o distinguiu dos demais pontos luminosos. Quatorze anos após a morte de Lowell, o jovem astrônomo americano Clyde W. Tombaugh encontrou tal objeto. A descoberta de Plutão foi anunciada em 13 de março de 1930 como um "objeto aparentemente transnetuniano". Desde então, Plutão passou a ser considerado o menor planeta do Sistema Solar. Suas características orbitais, muito diferentes daquelas apresentadas pelos demais planetas, sempre foram um enigma. A dificuldade de se avaliar precisamente massa e volume de Plutão dificultava a determinação de sua densidade, que permitiria saber se ele era um planeta gasoso ou rochoso. Somente em 1978, com a descoberta de seu maior satélite, Caronte, foi possível estimar com precisão sua densidade e concluir que se tratava de um corpo composto por mistura de gelo e rocha, típico da região transnetuniana. Outro fato atípico é que Caronte é excessivamente grande se comparado a Plutão, a ponto de ambos orbitarem um baricentro (centro de massa) localizado fora de Plutão. Ambos formam um sistema de dois corpos. Em síntese, Plutão era muito diferente e não se adequava à definição de planeta.

Com o desenvolvimento tecnológico, nossa capacidade de observação melhorou muito. Passamos a observar objetos pequenos a grandes distâncias, o que fez crescer a população de objetos do cinturão de Edgeworth-Kuiper (ver item 5.7). Com a descoberta de Eris (2003 UB313), objeto maior que Plutão, uma definição mais técnica de "planeta" tornou-se necessária e inadiável. Eris e Plutão orbitam o Sol e têm massas suficientemente grandes para serem quase esféricos como os demais planetas, mas têm características orbitais muito diferentes daquelas apresentadas pelos planetas, porém típicas de objetos pequenos. Algo semelhante ocorre com Ceres, do cinturão principal de asteroides (item 5.6). A União Astronômica Internacional coordenou discussões a respeito, que resultou na criação de uma nova classe de objetos: os planetas-anões. Essencialmente, planeta-anão é um objeto que orbita o Sol, é grande o suficiente para ter formato esférico, porém

Nome	Diâmetro equatorial aproximado (km)	Massa aproximada (kg)	Distância do Sol (UA)	Período Orbital (anos)
Ceres	975	$0,95 \times 10^{21}$	2,77	4,6
Plutão	2306	$13,1 \times 10^{21}$	39,48	248,1
Haumea	1500	$4,2 \times 10^{21}$	43,34	285,4
Makemake	entre 1600 e 2000	$3,0 \times 10^{22}$	45,79	309,9
Éris	2400	$16,7 \times 10^{21}$	67,67	557

Tabela 4- Parâmetros orbitais e físicos dos planetas-anões.

não é gravitacionalmente dominante na sua órbita. Os planetas-anões que têm características parecidas com as de Plutão são classificados como plutoides.

Atualmente há cinco planetas-anões: Ceres (do cinturão principal de asteroides), Eris, Plutão, Makemake e Haumea, mas há vários candidatos à espera de classificação. Na tabela 4 têm-se os parâmetros orbitais e físicos mais importantes destes objetos

Metano parece ser o constituinte básico de Plutão, mas sua densidade (2 g/cm^3) sugere a presença de material rochoso. A forma esférica, a densidade e a rotação indicam tratar-se de corpo diferenciado com manto e núcleo provavelmente sólido. O manto concentra 25% da massa total e pode ser composto majoritariamente de água congelada enquanto que seu núcleo deve ser rochoso. Sua superfície deve ser composta de minerais ricos em água e amônia. Caronte é parecido com Plutão. Acredita-se que Plutão e seus três satélites sejam o resultado de fragmentação decorrente de uma colisão.

Eris é o maior objeto transnetuniano conhecido até o momento. Ele é um pouco maior que Plutão e tem um satélite, Disnomia. Eris é relativamente uniforme, claro e mais brilhante que Plutão.

Makemake é o terceiro maior planeta-anão, também do cinturão de Edgeworth-Kuiper. Seu diâmetro é cerca de três quartos do diâmetro de Plutão. Sua superfície é coberta por metano e, possivelmente, etano congelados. Até o momento, não se sabe se ele possui satélites.

Haumea é um planeta-anão do tipo plutoide, pertencente ao cinturão de Edgeworth-Kuiper. Ele tem dois satélites pequenos que, acredita-se, sejam também destroços de colisão antiga. Haumea tem características pouco comuns, tais como a rápida rotação, alongação extrema e superfície muito brilhante (possivelmente de gelo de água) e sua forma ovalada.

Ceres, ao contrário dos demais planetas-anões, se encontra no cinturão principal de asteroides. Com seu diâmetro de aproximadamente 950 km ele é o corpo mais maciço do cinturão e contém quase um terço da massa total do cinturão. Ceres é praticamente esférico, com uma pequena protuberância de 30 km no equador. Internamente acredita-se que ele seja estruturado em camadas, com um núcleo rochoso denso recoberto por um manto de água doce congelada, por sua vez envolto por uma crosta fina. Estima-se que o manto represente 25% da massa de Ceres, e pode conter mais água doce que a Terra.

Diâmetro equatorial	3476,2 km	Distância média	378.000 km
Diâmetro polar	3472 km	Apogeu	406.000 km
Massa	$7,35 \times 10^{22}$ kg	Perigeu	363.000 km
Variação de temperatura	de 100 K a 400 K	Período de revolução	27,322 dias

Tabela 5- Parâmetros orbitais e físicos da Lua.

5.5 OS SATÉLITES

Satélites são corpos que orbitam planetas, planetas-anões e asteroides, sendo que estes orbitam o Sol. Todos os satélites são sólidos. Alguns são rochosos como a Lua, outros são recobertos por gelo, porém apenas alguns têm atmosfera. Os satélites Ganimedes e Titã são maiores que Mercúrio, mas Calisto é quase do mesmo tamanho. Io é um pouco maior que a Lua e Europa é um pouco menor. Oito satélites têm entre 1.000 e 1.500 km de diâmetro, mas a grande maioria é de objetos pequenos. Io, satélite de Júpiter, é o corpo que apresenta a maior atividade vulcânica do Sistema Solar. Pela diversidade das características que apresentam os satélites nos ajudam a desvendar detalhes da formação deles e de seus planetas.

• LUA

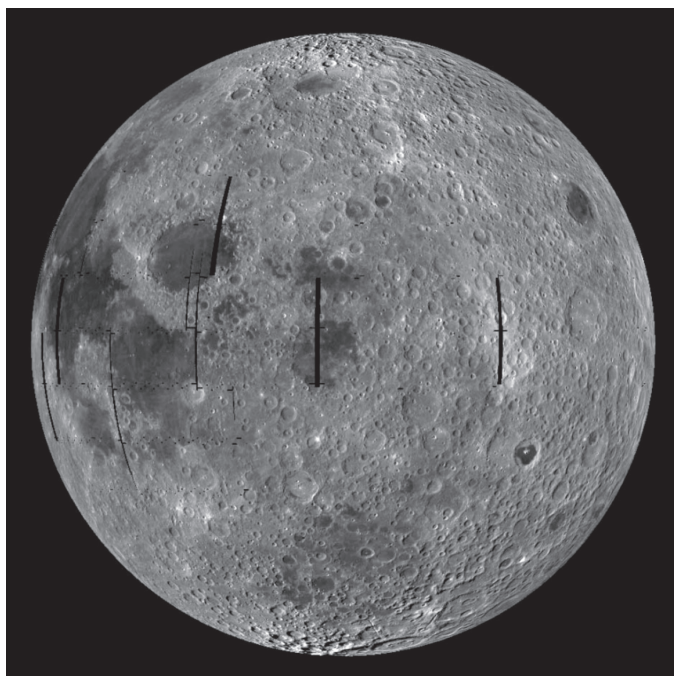
É o satélite que conhecemos melhor. A tabela 5 apresenta os parâmetros físicos e orbitais mais importantes.

- Interior

A Lua é um corpo diferenciado, isto é, seu material está distribuído de acordo com a densidade: os materiais mais densos estão em profundidades maiores. A densidade média das rochas trazidas pelos astronautas da missão Apolo (3 g/cm^3) é muito próxima da densidade média da própria Lua ($3,3 \text{ g/cm}^3$). Isto nos permite concluir que nosso satélite não deve possuir um núcleo metálico maciço. A deficiência de ferro na Lua corrobora esta conclusão.

Estruturalmente, a Lua pode ser dividida em três camadas básicas: (a) uma crosta assimétrica com espessura de 60 km no hemisfério voltado para a Terra, e de 100 km no hemisfério oposto; (b) um manto com 935 km de espessura; (c) um núcleo possivelmente sólido, com 738 km de raio.

Sismômetros deixados na Lua durante as missões americanas Apollo revelaram dois tipos de eventos. O mais frequente acontece quando a Lua está no apogeu (mais afastada da Terra) ou no perigeu (mais próxima da Terra), portanto decorrente de efeito de maré (de formação provocada pela força gravitacional da Terra sobre a Lua). O outro provém de camadas mais profundas e pode estar relacionado com o impacto de meteoroides.



11- Visão rara da Lua, mostrada pela sonda americana Lunar Reconnaissance Orbiter. A metade esquerda é parte da face voltada para a Terra, a metade direita é parte do hemisfério invisível da Terra (NASA/GSFC/Arizona State University).

- Superfície

A Lua apresenta, basicamente, dois tipos de terreno: (a) mares - regiões planas, baixas, escuras e de composição basáltica. Eles se formaram de um processo duplo, onde impactos violentos, provocados pela queda de corpos com diâmetros acima de 30 km, geraram atividade vulcânica. (b) continentes - terras altas, acidentadas, de alta refletividade (brilhantes) e marcadas por crateras de impacto (figura 11). Toda a superfície lunar é recoberta por uma camada relativamente espessa de poeira, chamada regolito, originada da pulverização das rochas pelo bombardeamento de corpos cadentes durante sua história. A variação rápida de temperatura, decorrente da inexistência de atmosfera, ajuda a trincar e pulverizar as rochas.

A análise laboratorial do material lunar comprovou que nos continentes predominam os anortositos (rochas ígneas formadas por feldspatos do tipo plagioclásico). Essas rochas têm no mínimo quatro bilhões de anos. Já a região dos mares é dominada por material de origem vulcânica muito comum na Terra e nos outros planetas rochosos. Suas idades oscilam entre 3,8 e 4,0 bilhões de anos.

A comparação das abundâncias do oxigênio e seus isótopos nas rochas terrestres e lunares revelam uma semelhança entre os dois corpos. Os mares são quimicamente homogêneos e diferem dos continentes porque possuem menor abundância de alumínio.

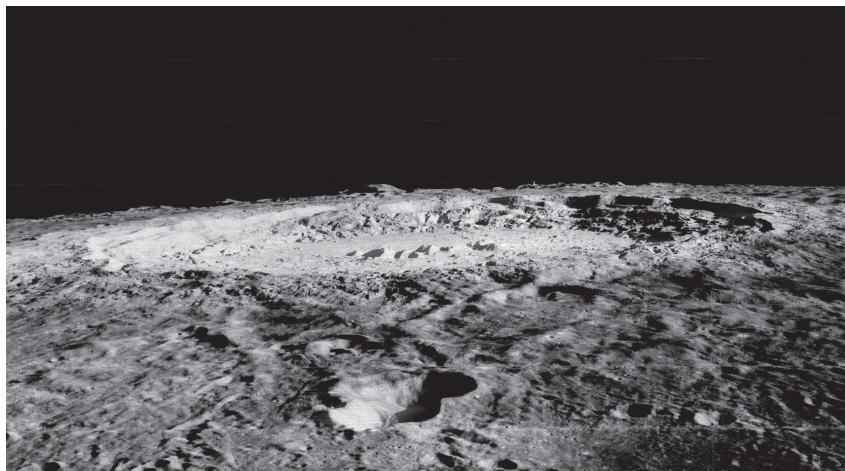
- Crateras

A maioria das crateras lunares tem origem colisional, por isso têm paredes baixas e pouco inclinadas. As maiores possuem diâmetros superiores a 1.000 km, picos centrais (formados por ondas sísmicas deflagradas durante o impacto) e raios brilhantes (figuras retilíneas que emanam dos bordos na direção radial e se estendem a grandes distâncias, formadas pela ejeção de material da colisão). Um exemplo típico é a cratera Copérnico (figura 11).

A superfície lunar apresenta ainda inúmeras caldeiras vulcânicas com escoamento de lavas, parecidas com aquelas encontradas na Terra, mas em menor escala.

- Idade

A idade do terreno lunar pôde ser determinada com precisão através da análise do material trazido para a Terra. Amostras colhidas nos mares revelam idade entre 3,2 e 4,0 bilhões de anos, semelhante



12- A cratera Copernico, com 93 km de diâmetro, está localizada na região do Mar Imbrium, do lado nordeste da Lua (NASA/JPL/USGS).

às rochas terrestres mais antigas. Isto significa que se passaram cerca de 800 milhões de anos entre a fusão e a solidificação desse material. Já amostras de material característico dos continentes têm idades entre 3,8 e 4,0 bilhões de anos, ou seja, os continentes são mais antigos.

- Atmosfera

Atmosfera lunar é praticamente desprezível, sua massa não ultrapassa dez toneladas de matéria. Os elementos mais abundantes são Na, K, ^{222}Rn , ^{210}Po , ^{40}Ar , ^4He , O_2 , CH_4 , N_2 , CO e CO_2 . Esses gases provêm de degasamento interno ou de bombardeamento das rochas superficiais por micrometeoritos, íons e elétrons oriundos do Sol. Na ausência de atmosfera, a mudança da luminosidade entre dia e noite é repentina, não há crepúsculos, e a temperatura oscila entre -233°C e 123°C .

- Origem

A Lua deve ter se formado a partir de um impacto violentíssimo entre um corpo com as dimensões de Marte e a Terra, há quatro bilhões de anos. Nessa época a Terra já estava diferenciada em núcleo metálico e manto silicático. O material que formou Lua teria sido arrancado da crosta dos dois corpos, formando um anel em torno do nosso planeta, que, aos poucos, se agregou para formar a Lua. Este processo colisional explica detalhes importantes, como, a crosta ser rica em silicatos e deficiente em ferro, o baixo teor de água nas rochas, a semelhança da composição isotópica do oxigênio, e a abundância de ouro e platina na superfície terrestre.

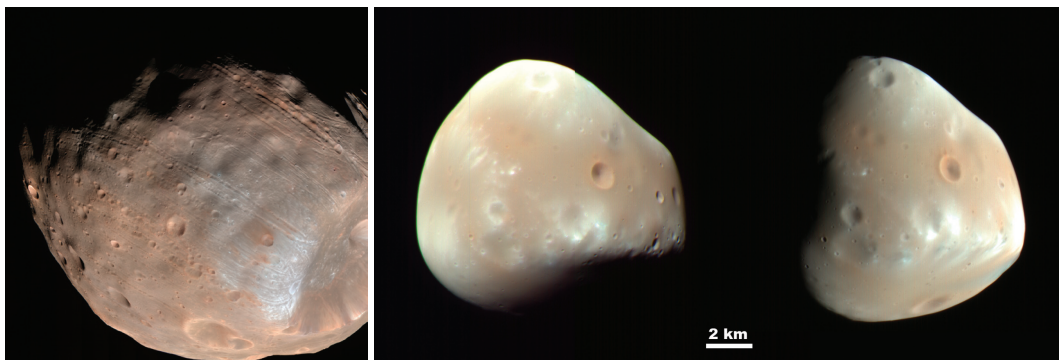
- Satélites de Marte

Marte tem dois satélites rochosos, pequenos e assimétricos: Fobos e Deimos. A tabela 6 apresenta suas principais propriedades, e a figura 13 mostra partes de suas superfícies.

Vistos da superfície marciana Deimos nasce a leste e põe-se a oeste, e Fobos transita em sentido oposto. A razão está nos períodos orbitais (veja tabela 6): Fobos dá uma volta em torno de Marte em apenas 7,7 horas, enquanto Deimos demora 30,2 horas. Como o dia marciano tem aproximadamente 24 horas, Fobos cruza o céu de Marte de oeste para leste em 11 horas, e Deimos de leste para oeste em 2,7 dias locais.

Satélite (descoberta)	Distância (1.000 km)	Período Orbital (dia)	Tamanho (km)	Massa ($M_{LUA} = 1$)	Densidade (g/cm^3)
Fobos (1877)	9,4	0,32	14 ' 11 ' 9	$1,3 \cdot 10^{-7}$	1,9
Deimos (1877)	23,5	1,26	8 ' 6 ' 6	$2,7 \cdot 10^{-8}$	2,1

Tabela 6- Parâmetros orbitais e físicos dos satélites de Marte.



13- Fobos (esquerda) e Deimos. Imagens fora de escala (Mars Reconnaissance Orbiter <http://mars.jpl.nasa.gov/mro/gallery/press/20080409a.html>).

A superfície de Fobos é marcada por crateras pequenas e apenas uma cratera grande. A superfície de Deimos é mais lisa, sem grandes crateras, porém com numerosas figuras brilhantes, cuja natureza ainda não é bem conhecida.

Quimicamente, esses satélites são feitos de rocha menos densa que Marte, são mais escuros que a Lua e mais parecidos com Ceres (planeta-anão). É possível que ambos sejam dois asteroides capturados por Marte. A órbita de Fobos está encolhendo e, em futuro distante, ele poderá chocar-se com a superfície marciana.

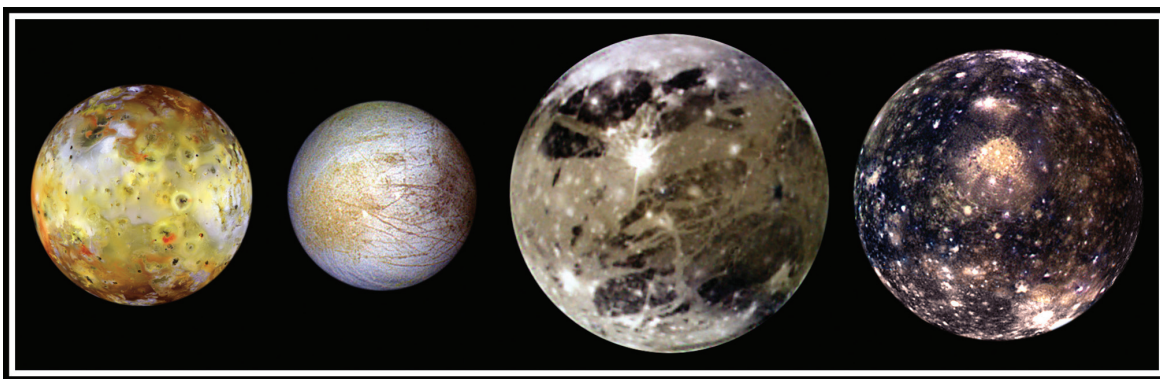
• Satélites de Júpiter

Até o momento são conhecidos 63 satélites jovianos. Os maiores são Io, Europa, Ganimedes e Callisto, também conhecidos como satélites galileanos, pois foram descobertos por Galileu Galilei (figura 14).

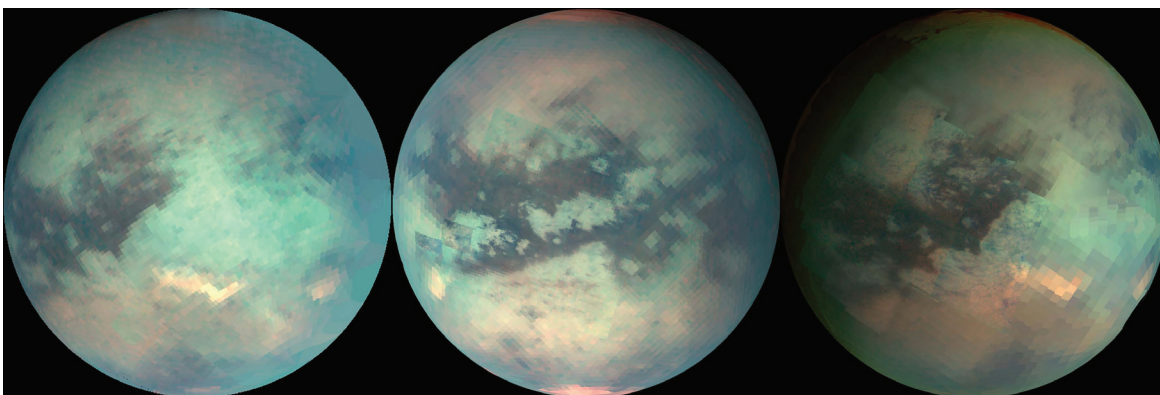
Io é o satélite mais próximo de Júpiter, por isso sofre maré intensa que o deforma e dissipa energia suficiente para provocar vulcanismo. É um corpo pouco maior que a Lua, de temperatura elevada, que apresenta continuamente violentas e gigantescas erupções vulcânicas, com jatos de matéria que podem atingir 200 km de altura acima de sua superfície. Sua cor amarelada é decorrente das erupções contínuas, que incluem enxofre líquido e compostos sulfurosos.

Europa, o segundo satélite a partir de Júpiter, tem superfície recoberta de gelo e com poucas crateras. Trata-se, portanto, de superfície geologicamente jovem. Figuras como rachaduras, enrugamentos, trincas e desalinhamento de blocos, lembram aquelas encontradas nas regiões polares terrestres, típicas de oceanos com superfícies congeladas.

Ganimedes, o terceiro satélite, é o maior satélite do Sistema Solar e maior que Mercúrio. O relevo de sua superfície lembra o da Lua, com a diferença que ela é de gelo, não de rochas. As regiões



14- Da esquerda para a direita, Io, Europa, Ganimedes e Calisto (Sonda Galileu - NASA/JPL/DLR).



15- Titã fotografado pela sonda Cassini entre 2005 e 2006, na região do infravermelho (que penetra sua espessa atmosfera) [NASA/JPL/University of Arizona].

escuras, como a conhecida por Galileo Regio, são fortemente marcadas por crateras de impacto, portanto são muito antigas. As regiões claras são geologicamente mais jovens, têm poucas crateras, e devem ter sido formadas por impactos violentos que provocaram afloramento de água do interior do satélite e se congelaram como planícies. Há indícios de que Ganimedes tenha sido fundido (derretido) por colisões violentas no passado remoto. As rochas mais densas afundaram em direção ao centro.

Calisto se parece muito com Ganimedes, porém tem maior quantidade de crateras. Sua superfície é mais antiga, provavelmente formada há cerca de quatro bilhões de anos, e a estrutura interior não é similar a de Ganimedes.

Os demais satélites jovianos são bem menores que os galileanos, alguns com diâmetros de apenas algumas dezenas de quilômetros ou menos.

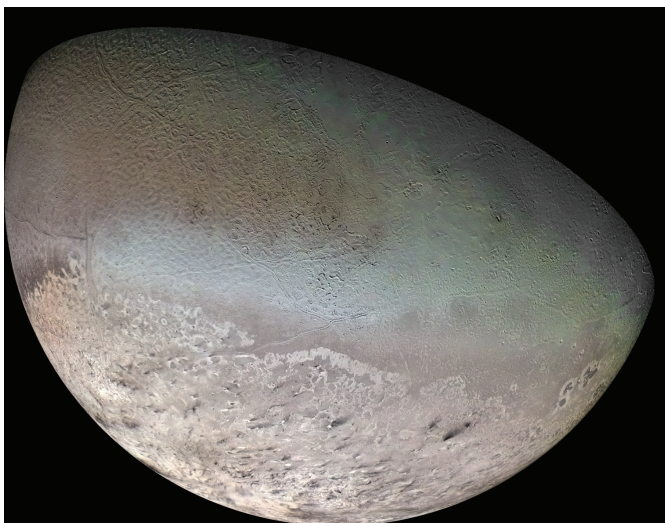
• Satélites de Saturno

Titan, o maior satélite de Saturno, desperta grande interesse científico. Ele é um pouco maior que Mercúrio e ligeiramente menor que Ganimedes, possui extensa atmosfera, rica em metano e etano, e superfície com relevo acidentado e lagos de metano. Durante o inverno, o metano atmosférico é parcialmente congelado nas partes elevadas e os lagos se congelam. No verão, o metano congelado se liquefaz e escorre para as partes mais baixas na forma de riachos e rios que desembocam nos lagos, em um ciclo parecido com o da água na Terra. A atmosfera primitiva da Terra pode ter sido parecida com a de Titã.

Além de Titã, há quatro satélites de ultrapassam 1.000 km de diâmetro: Reia, Iapetus, Dione e Tétis. Os demais satélites são bem menores, alguns com apenas algumas dezenas de quilômetros.



16- Titânia é o maior satélite de Urano (Voyager 2 images taken Jan. 24, 1986 – NASA/JPL).



17- Tritão tem a superfície mais fria do Sistema Solar, -235°C (Voyager 2, 1989, NASA/JPL).

• Satélites de Urano

Urano tem apenas quatro satélites grandes: Titânia, Oberão, Umbriel e Ariel, em ordem decrescente de tamanho. Aparência, estrutura e história de Titânia e Oberão lembram as de Réia, satélite de Saturno. Umbriel é o corpo mais escuro do Sistema Solar, mas apresenta uma atípica região esbranquiçada na face mais voltada para o Sol. Ariel, que tem quase o mesmo tamanho, tem superfície bem mais clara, com sinais de atividade geológica antiga.

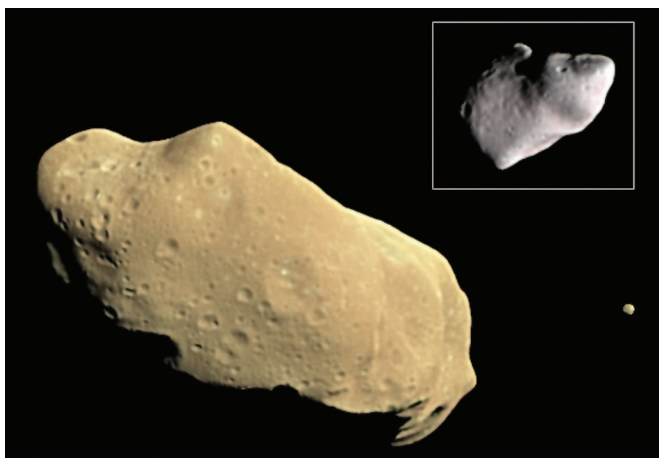
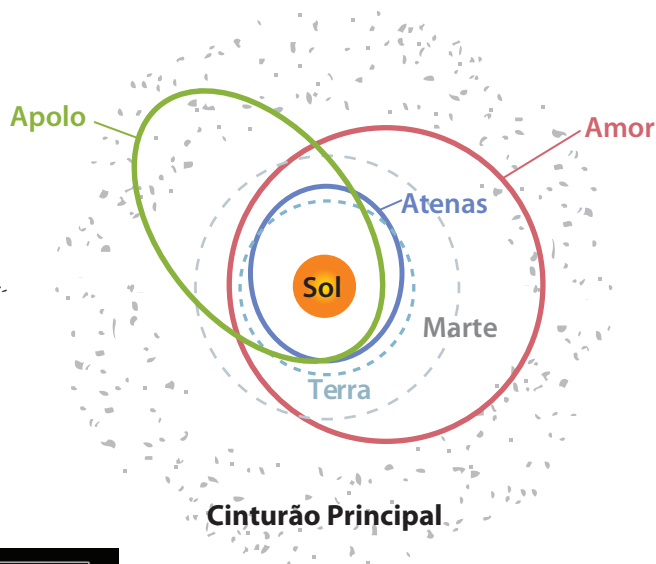
Os demais satélites são muito menores.

• Satélites de Netuno

O planeta mais distante tem apenas um satélite de grandes proporções: Tritão, pouco maior que Plutão. Os demais satélites netunianos são bem menores. Tritão tem variedade de terrenos, de penhascos profundos a planícies em lagos congelados, provavelmente de água. A temperatura em sua superfície é muito baixa, -236°C , e ele possui uma atmosfera muito tênue de nitrogênio. Nessa temperatura o gelo adquire resistência equivalente a de materiais metálicos. Na região polar sul há regiões cobertas por neve de nitrogênio. A sonda Voyager 2 mostrou jatos de nitrogênio líquido, semelhantes aos gêiseres terrestres. Provavelmente, eles sejam as fontes que mantêm a atmosfera de Tritão.

Com cerca de 470 km de diâmetro, o satélite Miranda tem, provavelmente, a superfície mais bizarra do Sistema Solar. Ela apresenta terrenos distintos, com ranhuras, fissuras, sulcos etc. que demonstram um passado violento, possivelmente de colisões com outros corpos.

18- O cinturão Principal de asteroides, entre Marte e Júpiter, e os grupos Atenas, Apolo e Amor.



19- O asteroide Ida ($56 \times 24 \times 21$ km) e seu satélite Dáctilo ($1,2 \times 1,4 \times 1,6$ km) pertencem ao Cinturão Principal (Sonda Galileu, 1993, NASA/JPL/USGS).

5.6 ASTEROIDES E FRAGMENTOS ROCHOSOS (METEOROIDES)

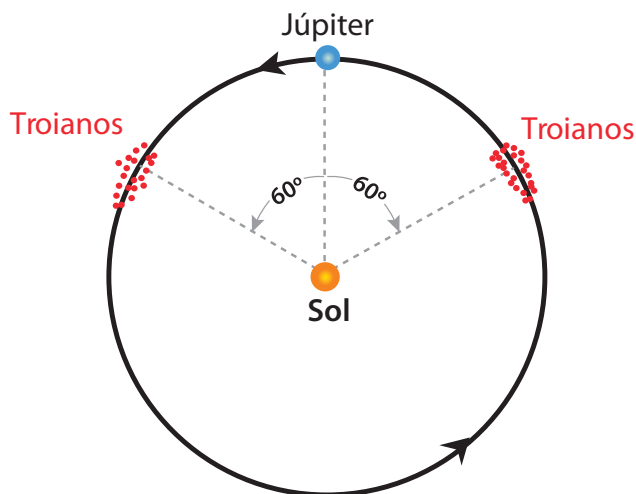
Asteroide é palavra de origem grega que significa "semelhante à estrela". Visto de longe, um asteroide se parece com um ponto luminoso. Qualquer objeto pequeno ou muito distante terá tal aparência. Neste livro, o termo asteroide será aplicado aos corpos menores de composição química rochosa (ver tabela 1).

Os asteroides são objetos rochosos, relativamente pequenos, com formas e tamanhos diversos. Os maiores são aproximadamente esféricos. A maior parte deles está concentrada entre Marte e Júpiter, no cinturão asteroidal, ou cinturão principal, orbitando o Sol em trajetórias quase circulares. Mas há asteroides com órbitas bem elípticas, alguns cruzando a órbita da Terra.

Os asteroides foram descobertos apenas no século 19. No primeiro dia do ano de 1801, o astrônomo italiano Giuseppe Piazzi descobriu um objeto novo que se movimentava com maior rapidez que os planetas. Ele foi batizado como Ceres, hoje classificado como planeta-anão. Sua órbita estava entre as órbitas de Marte e Júpiter. Nos anos seguintes, foram descobertos Pallas, Juno e Vesta, todos nessa região. Os asteroides maiores receberam nomes próprios, mas a grande maioria é identificada por sigla.

• Cinturão Principal de Asteroides

A tabela 7 apresenta algumas características físicas e orbitais dos principais asteroides do cinturão. A figura 18 ilustra a região principal dos asteroides, entre 2 e 4 UA.



20- Os asteroides troianos circulam na mesma órbita de Júpiter e se agrupam nas proximidades dos pontos lagrangianos L4 e L5.

O cinturão não é preenchido uniformemente, existem regiões praticamente desprovidas de asteroides. Isto ocorre por conta da influência gravitacional de Júpiter, que altera as órbitas dos asteroides que estejam nessas regiões. A massa total dos asteroides do cinturão é da ordem de um milésimo da massa da Terra.

• Grupos e famílias de asteroides

Os asteroides podem ser agrupados em função das características de suas órbitas, sem que mantenham necessariamente relação entre si. Outros, no entanto, apresentam órbitas tão similares que podem ter uma origem comum, por exemplo a fragmentação de corpos maiores decorrentes de colisão. Neste caso, podemos reuni-los em famílias.

Existem asteroides que circulam o Sol na região interna da órbita da Terra, ou seja, seus afélios jamais ultrapassam 1 UA. Alguns deles cruzam as órbitas de Mercúrio e/ou de Vênus. Outro grupo de asteroides tem periélios menores que 1 UA, ou sejam, eles cruzam a órbita da Terra. Os grupos Atenas e Apollo são exemplos. Os do grupo Atenas têm afélios da ordem de 1,2 UA, já as distâncias afélicas do grupo Apollo é quase dobro. Os asteroides que se aproximam da Terra são também conhecidos como Asteroides Próximos da Terra (ou pela sigla NEA – *Near Earth Asteroids*). Os asteroides do grupo Amor possuem distâncias periélicas entre 1,1 e 1,3 UA, ou seja, entre Terra e Marte.

Alguns destes asteroides formam famílias. As maiores contêm centenas de asteroides, enquanto as famílias menores têm apenas alguns membros. Conhecemos cerca de duas a três dezenas de famílias, a maioria no cinturão principal de asteroides. As famílias Pallas (associada ao asteroide 2 Pallas), Hungaria (associada ao asteroide 434 Hungaria) e Phocaea (associada ao asteroide 25 Phocaea) são alguns exemplos.

Os Troianos são asteroides que giram em torno do Sol na mesma órbita de Júpiter, portanto com o mesmo período do planeta. Na realidade eles não se espalham pela órbita de Júpiter. Eles se concentram em duas regiões específicas e equidistantes do planeta, 60° à frente e 60° atrás. Esses locais são conhecidos como pontos de Lagrange L4 e L5, em homenagem ao matemático Joseph-Louis de Lagrange, que estudou a interação gravitacional entre três corpos, no caso asteroide, Júpiter e Sol. Esses pontos formam o ápice de dois triângulos equiláteros que têm os três astros como vértices.

Asteróide (descoberta)	Diâmetro ¹ (km)	Rotação (horas)	Excentricidade	Albedo	Tipo ²
Pallas (1802)	583	7,9	0,23	0,09	M
Juno (1804)	249	7,2	0,26	0,16	S
Vesta (1807)	555	5,3	0,09	0,26	S
Astraea (1845)	116	16,8	0,19	0,13	S
Hebe (1847)	206	7,3	0,20	0,16	S
Iris (1847)	222	7,1	0,23	0,2	S
Elora (1847)	160	13,6	0,16	0,13	S
Metis (1848)	168	5,1	0,12	0,12	S
Higiea (1849)	443	18	0,12	0,05	C
Eros (1898)	20	5,3	0,22	0,18	S
Aquiles (1906)	70		0,15		
Hektor (1907)	230	6,9	0,03	0,03	C
Hidalgo (1920)	30	10,1	0,66		M
Amor (1932)	5?		0,43		
Icarus (1949)	2	2,3	0,83		
Appolo (1932)	2,5		0,56		
Chiron (1977)	320		0,38		

(1) Por serem pequenos, nem sempre os asteroides são esféricos; estes valores são os que representam melhor seus volumes. (2) Ver tabela 9.

Tabela 7- Características físicas e orbitais dos principais asteroides (*Fundamental Astronomy*, H. Karttunen, P. Kroger H. Oja, M. Poutanen, K.J. Donner, Springer Verlag, p. 490, 1995).

Tipo	C	M	S
Abundância	60%	≤ 10%	≈ 30%
Composição predominante	C + Fe ₃ O ₄	Metais	Silicatos
Albedo	< 5%	≈ 10%	≈ 15%
Cor	Escuros	Intermediário	Claros
Posição	cinturão externo (próximo de Júpiter)	cinturão intermediário	cinturão interno (próximo de Marte)

Tabela 8- Características (valores médios) dos asteroides do cinturão.

• Composição química e origem

Os asteroides do cinturão principal apresentam diferenças de composição química, que guardam certa relação com a posição orbital. Os mais próximos de Marte (30% do total), conhecidos por tipo S, são mais claros e formados basicamente de uma mistura de rocha (silicatos) e ferro, muito parecidos com os meteoritos ferropétreos. Já os asteroides mais próximos de Júpiter (60% do total), conhecidos por tipo C, são mais escuros e têm composição química semelhante a dos meteoritos condritos carbonáceos. Os demais asteroides, conhecidos por tipo M, são constituídos basicamente de uma liga metálica de ferro e níquel, semelhantes aos meteoritos sideritos (tabela 8).

A origem dos asteroides é um assunto ainda em discussão. A hipótese mais aceita é que eles sejam fragmentos (planetésimos) que, na época de formação do Sistema Solar, não se agregaram aos planetas por influência gravitacional de Júpiter. Colisões mútuas posteriores fragmentaram os objetos maiores dessa região, aumentando a população dos asteroides. Asteroides do tipo metálico (liga de ferro e níquel) só podem ter origem no núcleo de corpos grandes e diferenciados que se fragmentou por colisão.

5.7 CORPOS TRANSNETUNIANOS

O limite do Sistema Solar está bem mais adiante de Netuno, no mínimo a 0,5 a.l. (cerca de 31.620 UA), no máximo a 1,6 a.l.. A estrela mais próxima do Sol está a 4,3 a.l.. Ainda não sabemos com exatidão o que contém essa região imensa, mas é muito provável que ela seja preenchida por corpos de dimensões subplanetárias, de composição química mista (gases e rochas) e órbitas muito alongadas (elipses de alta excentricidade).

A importância dos objetos dessa região transnetuniana repousa nas suas características. Por estarem em região muito fria, distante do Sol, eles preservam a composição química primitiva que deu origem ao Sistema Solar. Eles formam um estofo de matéria que não foi agregada aos corpos maiores, por isso podem fornecer informações inéditas sobre a história e a evolução do Sistema Solar. Suas órbitas, por exemplo, podem nos ajudar a compreender como as órbitas dos planetas gigantes evoluíram desde a formação.

• Cinturão de Edgeworth-Kuiper

A primeira pessoa a postular a existência de uma população de corpos pequenos adiante de Netuno foi Frederick Leonard, em 1930. Treze anos mais tarde, Kenneth Edgeworth sugeriu a concentração desses objetos em um cinturão, semelhante ao dos asteroides entre Marte e Júpiter. Estudando os cometas de curto período, Gerard Kuiper concluiu em 1951 que eles provinham dessa região transnetuniana, mais especificamente entre 30 e 50 UA. Essa região ficou conhecida como Cinturão de Edgeworth-Kuiper.

A constatação visual desse cinturão ocorreu em 1992, com a descoberta de um objeto de 160 km de diâmetro, distante 43,7 UA do Sol e identificado como 1992 QB1. Desde então, outros corpos foram descobertos naquela região, e classificados de acordo com as características orbitais. Plutão é o mais famoso deles. Tritão pode ter pertencido a esta região antes de se tornar satélite de Netuno. Os objetos mais conhecidos dessa região são os três planetas anões Eris (maior que Plutão), Makemake, Haumea, além dos outros candidatos como Quaoar, Ixion e Varuna.

Atualmente, há evidências de que o cinturão de Edgeworth-Kuiper estenda-se até 100 UA. Estima-se que nessa região haja cerca de cem mil corpos com diâmetros maiores que 100 km e algo como um bilhão de objetos com diâmetros entre 100 e 10 km.



20- Cometa C/1995 O1, Hale-Bopp (Wei-Hao Wang, Institute for Astronomy, University of Hawaii).

Uma definição mais moderna e abrangente para os possíveis e diferentes objetos que ocupam essa região distante é Objetos Transnetunianos (sigla TNO, em inglês). Quimicamente, esses corpos são compostos (gases congelados e rocha), diferentemente dos asteroides (rochosos). Mesmo assim, eles têm diferenças aparentes: alguns são mais brilhantes que outros, e as cores variam entre azul-acinzentado e vermelho bem escuro. Isto é consequência das diferenças em composição química de suas superfícies. As evidências indicam a presença de água congelada, carbono amorfo (estrutura que não têm ordenação espacial, ao contrário do carbono cristalino), silicatos, nitrogênio, metano, etano, metanol, dióxido de carbono, macromoléculas orgânicas e outras espécies.

• Cometas

Os cometas são os astros que, certamente, mais fascinaram o ser humano. Sêneca (4 a.C.-65 d.C.), em seu Livro VII de *Naturales Quaestiones*, exemplifica muito bem este aspecto quando diz: "Não há mortal tão apático, tão obtuso, tão voltado para a terra, que não se aprime e se oriente, com todas as forças do pensamento, para as coisas divinas, sobretudo quando algum fenômeno insólito aparece nos céus... Quando aparecem esses corpos (os cometas) de chama, com forma rara e insólita, todos querem ver como eles são, esquecem-se de tudo para se indagar sobre a novidade. Não se sabe se deve admirar ou temer, pois, nunca falta quem se aproveite para semear o medo prognosticando coisas terríveis" ("Cometas: do mito à ciência", Oscar T. Matsuura, Ícone Editora, pág.9, 1985).

Talvez o papel mais marcante dos cometas na vida do ser humano seja a possibilidade de eles serem as principais fontes de compostos orgânicos e água. Há evidências de que os cometas tiveram papel preponderante na formação da atmosfera atual e dos oceanos, bombardeando a Terra há cerca de quatro bilhões de anos.

Fisicamente, cometas são corpos de massa pequena, composta essencialmente de gases congelados como água (80%), monóxido de carbono (10%), dióxido de carbono (3,5%), compostos orgânicos ricos em carbono (alguns %), CHONs (grãos ricos em C, H, O, e N, diferentes da poeira terrestre rica em Si, O, Fe, e outros metais) e grãos de silicatos. Esta estrutura forma o núcleo do cometa, com tamanho inferior a dezenas de quilômetros e massa típica entre 100 e 1.000 bilhões de toneladas (figura 20).

Ao se aproximar do Sol, a temperatura superficial desse núcleo aumenta e o material volátil é sublimado, isto é, passa da fase sólida diretamente para a fase gasosa. O gás expelido na forma de jato arrasta os grãos impregnados nessa massa congelada formando a coma, um invólucro aproximadamente esférico de 100.000 km de diâmetro que envolve o núcleo, e as caudas. O núcleo e a coma formam a cabeça do cometa.

O gás eletricamente neutro pode tornar-se carregado através da ionização provocada por fótons ultravioleta de origem solar. Como os íons são suscetíveis ao campo magnético carregado pelo vento solar eles são acelerados e arrastados na direção de expansão do vento solar, formando uma cauda estreita e linear de gás ionizado, chamada cauda Tipo I. A cauda ionizada é predominantemente azulada.

O material restante composto de gás neutro e poeira forma a cauda Tipo II, que é mais larga e mais curvada que a cauda ionizada. Os grãos de poeira são arrastados pela luz solar, porém com menos violência que no caso da cauda Tipo I, mantendo o formato curvo. As caudas Tipos I e II podem atingir comprimentos de até 1 UA e nem sempre estão presentes simultaneamente.

Normalmente o cometa fica envolto em um envelope imenso de hidrogênio, produzido pela fotodissociação do vapor de água pela luz solar.

A água é o componente majoritário de gelo cometário, também formado por hidratos de várias substâncias, tais como, CH_3 , NH_4 , CO_2 , e outros. Quando está distante do Sol, o brilho de um cometa provém da reflexão da luz solar pela matéria da coma e da cauda. Ao se aproximar do Sol, a cerca de 1 UA, as moléculas de gás passam a emitir luz por fluorescência (o gás é excitado por luz ultravioleta e, ao voltar a seu estado natural, libera o excesso de energia na forma de luz). Isto ocorre principalmente com carbono (C_2), cianogênio (CN), oxigênio (O_2), hidroxila (OH) e hidretos de nitrogênio (NH e NH_2). Nas distâncias heliocêntricas ainda menores surgem linhas de emissão do silício (Si), cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K) e níquel (Ni).

Tamanho e brilho aparentes dependem essencialmente das distâncias. Quanto mais próximo do Sol estiver o cometa, maiores serão o brilho e o tamanho. Quanto mais próximos nós estivermos do cometa, mais brilhante e maior ele nos parecerá. Portanto, brilho e tamanho aparentes dependerão dessas duas condições. Esta dependência de brilho e tamanho com a distância pode ser expressa por uma relação simples:

$$B = \frac{C}{R^n \Delta^2} \quad (4)$$

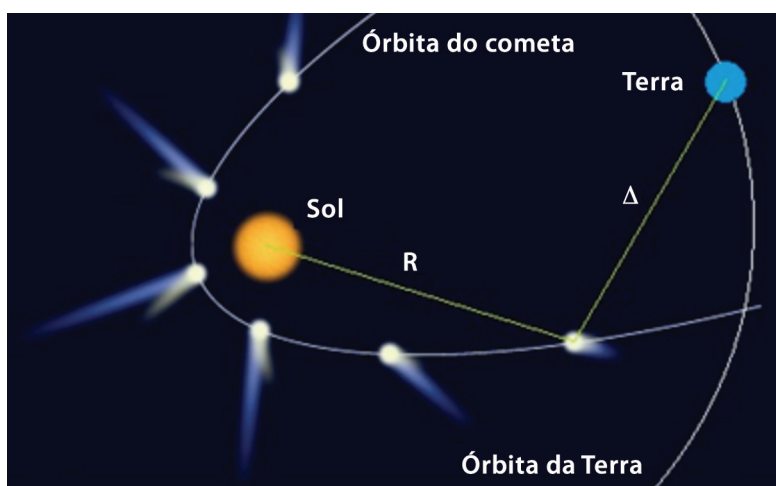
onde C é uma constante; R e D , respectivamente, as distâncias heliocêntrica e geocêntrica do cometa; e n o índice fotométrico. O parâmetro mais crítico nesta expressão é n . Ele varia com a distância heliocêntrica (geralmente n aumenta quando a distância heliocêntrica diminui), não é necessariamente igual nas sucessivas aparições do cometa e difere entre cometas. Valores razoáveis para n podem estar entre 1 e 6.

A longevidade de um cometa depende essencialmente de quão perto ele passar do Sol e da frequência com que faz isso. Quanto menor a órbita do cometa, mais tempo ele estará exposto ao aquecimento solar e mais rapidamente perderá sua componente volátil. O que restar dele será um bloco rochoso sem coma e cauda, parecido com um asteroide. Portanto, a longevidade de um cometa depende da sua órbita.

Considerando a diversidade de órbitas, podemos ordenar os cometas segundo seus períodos. Os períodos podem ser curtos (até algumas dezenas de anos), médios (dezenas a algumas centenas de anos) ou longos (várias centenas a milhões de anos). Cometas de períodos muito longos podem ser classificados como novos porque não há registros de passagens anteriores. Na realidade esses cometas estão circulando o Sol desde que o Sistema Solar foi formado.

Os cometas periódicos têm o prefixo “P/” antes do nome. O cometa 1P/Halley tem esta designação formal porque foi o primeiro a ser reconhecido como periódico. Sua órbita foi calculada pelo astrônomo inglês Edmund Halley em 1705, através da teoria de gravitação de Isaac Newton. Este cometa havia sido observado em 1472, pelo astrônomo alemão Johann Müller Regiomontano, mas o primeiro registro parece datar o ano 239 a.C..

Boa parte dos cometas periódicos pertence a famílias associadas aos planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno). Cometas da família de Júpiter, por exemplo, têm períodos menores que vinte anos. O cometa 1P/Halley pertence a uma família que leva seu nome Halley, cujos períodos vão de vinte a duzentos anos. A depender da aproximação com os planetas gigantes, os cometas podem ter suas órbitas alteradas, adquirindo períodos menores ou maiores.



22- O brilho aparente de um cometa depende simultaneamente da sua distância ao Sol (R) e da distância dele à Terra (D).

Normalmente os cometas novos têm órbitas muito alongadas (elipses de elevada excentricidade), que os levam a distâncias enormes do Sol. Por esta razão, esses cometas passam a maior parte de suas vidas em regiões muito frias. Estudando as características orbitais dos cometas de períodos muito longos, o astrônomo holandês Jan Hendrik Oort concluiu que esses objetos formavam uma nuvem esférica centrada no Sol, que ficou conhecida por Nuvem de Oort. Sua dimensão ainda não é bem conhecida, mas estima-se que ela ocuparia o espaço entre 5.000 e 100.000 UA, e poderia conter até um trilhão de cometas. Como os cometas são pequenos, a massa total deles deve ser menor que a de um planeta gasoso.

Perturbações gravitacionais (marés) causadas pela aproximação do Sol com estrelas, durante seu trajeto pela Via Láctea, lançam cometas na direção do Sol e eles surgem como cometas novos. Estes, quando visitam as partes internas do Sistema Solar, se aproximam de todas as direções, ao contrário dos cometas de curto período que o fazem através de órbitas quase coplanares à eclíptica.

5.8 ANÉIS PLANETÁRIOS E METEOROIDES

• Anéis

Anéis são enxames de partículas girando em torno de planetas, em órbitas circulares. As órbitas elípticas provocam colisões entre as partículas, que destroem o anel. Os anéis são finos, planos e estão no plano equatorial do planeta. Órbitas inclinadas resultam em colisões e destruição dos anéis.

Dois fenômenos gravitacionais explicam a existência dos anéis: ressonância e maré.

A ressonância orbital surge quando dois corpos em órbita exercem mutuamente influência gravitacional regular e periódica. Isto ocorre quando os períodos orbitais dos corpos estão relacionados por uma razão de dois números inteiros. Algumas ressonâncias são estáveis. Por exemplo, Plutão e Netuno estão em ressonância 3:2. A cada três revoluções de Netuno em torno do Sol ocorrem duas revoluções de Plutão, e os dois voltam na mesma posição relativa. Isto impede variações orbitais que possam aproximar muito os planetas.

Outras ressonâncias, no entanto, geram instabilidades nas órbitas dos corpos e criam lacunas. A Divisão de Cassini (tabela 9) é uma região que separa os anéis A e B de Saturno, em que predomina a

ressonância 2:1 com o satélite Mimas. O lado externo do anel A está sob ressonância desestabilizadora 7:6 com o satélite Janus. Pan, outro satélite, tem sua órbita dentro de uma região praticamente desprovida de material, conhecida como Lacuna de Enke. Ele é o responsável por essa lacuna.

O segundo fenômeno gravitacional é a força diferencial, conhecido como maré. Imagine um satélite orbitando um planeta. Como a força gravitacional que o planeta exerce sobre o satélite é inversamente proporcional à distância que os separa ($F_g \propto 1/d^2$), a face do satélite voltada diretamente para o planeta é mais fortemente atraída que a face oposta. A diferença entre essas forças (definida como força diferencial) provoca dilatação no satélite na direção da linha que une os centros dos dois corpos. Quanto maior for a força diferencial, maior será a dilatação. Se a força diferencial superar a força de autogravitação do satélite, ele se rompe. Esse limite de instabilidade, estudado por Edouard Roche, é conhecido como Limite de Roche. A expressão genérica é:

$$d = 2,44 R \sqrt[3]{\frac{\rho_M}{\rho_m}} \quad (5)$$

sendo R o raio do planeta, ρ_M e ρ_m as densidades do planeta e do satélite, respectivamente. Se os dois corpos tiverem a mesma composição química o Limite de Roche equivale a 2,44 raios do planeta. Para corpos esferoidais rochosos ou congelados maiores que 40 km em diâmetro, o coeficiente numérico é 1,38. Para corpos em queda direta no planeta, o coeficiente é 1,19.

Todos os planetas gasosos têm anéis, dentro dos respectivos limites de Roche. Saturno apresenta o sistema de anéis mais exuberante. Eles foram descobertos em 1610, quando Galileu Galilei usou sua luneta para observar o planeta. Como todo aparato óptico da época, a luneta de Galileu, que ampliava as imagens em cerca de dez a vinte vezes, era de má qualidade óptica. A lente objetiva era esverdeada, devido ao alto teor de ferro no substrato de vidro, tinha bolhas no seu interior, o polimento das superfícies era ruim, e a imagem produzida pelos bordos da lente era distorcida. Assim, os anéis de Saturno lhe pareciam como um par de saliências difusas da cada lado do planeta.

Utilizando um telescópio de melhor qualidade, Christian Huygens anunciou em 1659 que as saliências eram na realidade um disco chato e fino que contornava Saturno. Dezesesseis anos mais

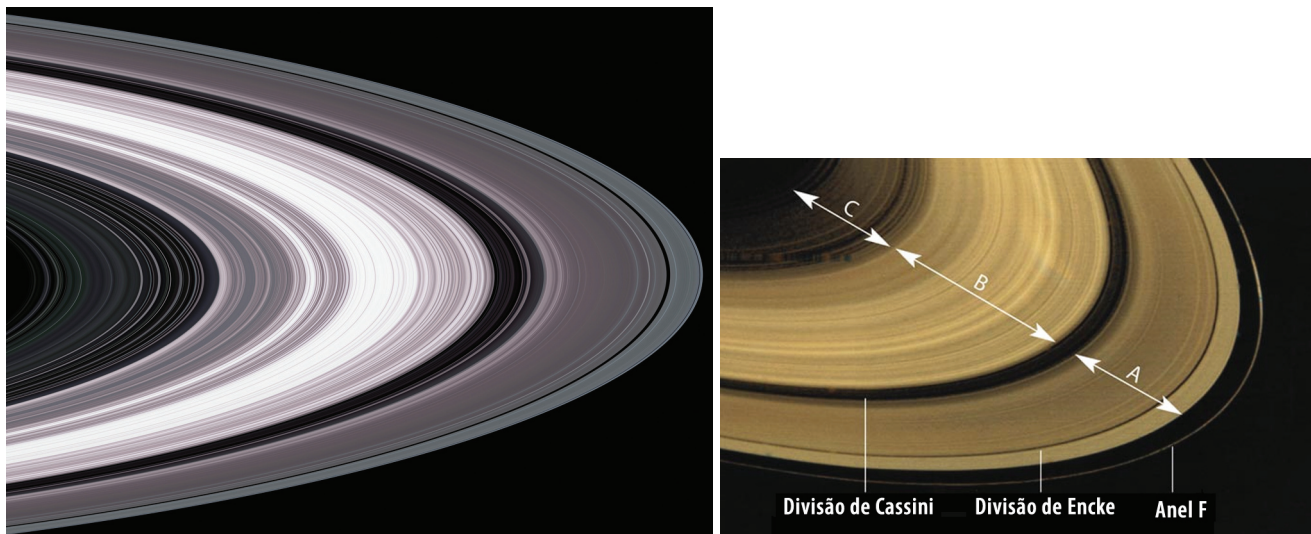
	Bordo interno	Bordo externo	Largura
Anel D	66.970 km	74.490 km	7.500 km
Anel C	74.490 km	91.980 km	17.500 km
Lacuna Colombo	77.800 km		100 km
Lacuna Maxwell	87.500 km		270 km
Lacuna Bond	88.690 km	88.720 km	30 km
Lacuna Dawes	90.200 km	90.220 km	20 km
Anel B	91.980 km	117.580 km	25.500 km
Divisão Cassini	117.500 km	122.050 km	4.700 km
Lacuna Huygens	117.680 km		285-440 km
Lacuna Herschel	118.183 km	118.285 km	102 km
Lacuna Russell	118.597 km	118.630 km	33 km
LacunaJeffreys	118.931 km	118.969 km	38 km
Lacuna Kuiper	119.403 km	119.406 km	3 km
Lacuna Laplace	119.848 km	120.086 km	238 km
Lacuna Bessel	120.305 km	120.246 km	10 km
Lacuna Barnard	120.305 km	120.318 km	13 km
Anel A	122.050 km	136.770 km	14.600 km
Lacuna Encke	133.570 km		325 km
Lacuna Keeler	136.530 km		35 km
Divisão Roche	136.770 km	139.380 km	2600 km
Anel F	140.224 km		30-500 km
Anel G	166.000 km	174.000 km	8.000 km
Anel E	180.000 km	480.000 km	300.000 km

Tabela 9- Sistema de anéis de Saturno (<http://planetarynames.wr.usgs.gov/append8.html>). Lacuna é falha menor que Divisão.

tarde, em 1675, Giovanni D. Cassini conseguiu distinguir dois anéis separados por uma lacuna escura, que ficou conhecida como Divisão de Cassini. Hoje sabemos que ela separa o anel mais interno B do anel A.

A realidade começou a ser esclarecida somente em 1857, quando James Clerk Maxwell demonstrou que os anéis saturninos deveriam ser constituídos por miríade de pequenas partículas, orbitando o planeta como se fossem satélites. Essa afirmação só foi confirmada em 1895 por análise espectroscópica. As partes mais internas giravam mais rápido que as mais externas, tal como se espera de um movimento circular regido pelas leis de Newton. Um disco rígido giraria com velocidade única.

Na década de 1970, as sondas espaciais americanas Pioneer (pioneira) e Voyager (viajante) mostraram que os anéis são compostos de partículas de gelo e rocha, com tamanhos que variam entre fração de milímetro e algumas dezenas metros. Atualmente a sonda americana Cassini, revela detalhes até então desconhecidos. Por exemplo: (a) os anéis principais são formados por inúmeros anéis menores; (b) as lacunas não são vazias, mas preenchidas por anéis rarefeitos; (c) o anel E, o mais externo, é formado por partículas de gelo ejetadas do satélite Encélado, através de geisers localizados nas proximidades do seu polo sul; (d) pequeninos satélites orbitam Saturno dentro de determinados anéis.



23- Sistema de anéis de Saturno (NASA/JPL).

Os anéis de Saturno são muito finos, se comparados aos seus diâmetros. Se a espessura fosse representada pela espessura de uma folha de papel, cerca de um décimo de milímetro, o diâmetro do anel mais externo teria 40 metros. Trata-se na realidade de um sistema bastante complexo envolvendo satélites próximos. Resumidamente, o sistema é composto de 7 anéis, 9 estruturas aneladas, 2 divisões, 14 lacunas e 18 pequenos satélites.

Os três anéis principais são, em ordem decrescente de largura, B, C e A. Eles são compostos por uma miríade de anéis finos, constituídos de partículas com dimensões que variam de fração de milímetro a dezenas de metros. Partículas rochosas predominam na região mais próxima de Saturno, enquanto partículas de gelo são mais abundantes na região mais externa do disco.

O anel mais largo, e também o mais externo, é o E. Ele preenche a região entre as órbitas dos satélites Mimas e Reia. Esse anel difuso é constituído de partículas microscópicas compostas de silicatos e água, dióxido de carbono e amônia congelados. Essas partículas são geradas por jatos criogênicos da região polar sul do satélite Encélado.

O anel mais estreito é o F. Ele é rarefeito, sinuoso, com concentrações locais, arcos e possivelmente figuras transientes que aparecem e desaparecem.

Júpiter, Urano e Netuno também têm anéis de gelo e rocha, só não tão extensos e complexos como os de Saturno. Além disso, eles são muito difíceis de ser ver da Terra, mesmo com telescópios potentes.

Os anéis de Júpiter foram descobertos em 1979 pela sonda Voyager 1, mas sua origem era um mistério. Observações posteriores da sonda Galileu, projetada para observar Júpiter e seus satélites principais entre 1995 e 2003, confirmaram que os anéis foram criados por impactos de meteoroides nos satélites menores e próximos do planeta.

De fato, o sistema de anéis joviano é bem mais simples que o de Saturno, os anéis são mais finos e compostos de poeira meteorítica. Basicamente, são três anéis. O mais interno tem aparência de um toroide nebuloso, por isso é chamado de Anel Halo. Ele se estende de 92.000 km até cerca de 122.500 km do centro de Júpiter. Como o raio do planeta é cerca de 71.400 km, este anel situa-se a apenas 20.000 km acima das nuvens elevadas de Júpiter. O intermediário, Anel Principal, é estreito, fino e concentrado na região entre 122.500 km e 128.940 km do centro de Júpiter. Ele tem 6.440 km de largura e 30 km de espessura. O anel seguinte é espesso e uniforme, mas muito tênue, e estende-se

Nome	Raio (km)	Raio relativo	Largura (km)
Equador de Urano	25.559	1,000	
6	41.837	1,637	1,5
5	42.235	1,652	2
4	42.571	1,66	2,5
Alfa	44.718	1,750	4 – 10
Beta	45.661	1,786	4 – 11
Eta	47.176	1,834	1,6
Gamma	47.626	1,863	1 – 4
Delta	48.303	1,900	3 – 7
Lambda	50.024	1,957	2
Epsilon	51.149	2,006	20 – 96
Equador de Netuno	24.766	1,000	
Galle (1989N3R)	41.900	1,692	2.000
LeVerrier (1989N2R)	53.200	2,148	110
Lassell (1989N4R)*	53.200	2,148	4.000
Arago (1989N4R)*	57.200	2,310	< 100
Sem nome	61.950	2,501	
Adams (1989N1R)	62.933	2,541	50
Coragem	62.933	2,541	15
Liberdade	62.933	2,541	15
Igualdade 1	62.933	2,541	15
Igualdade 2	62.933	2,541	15
Fraternidade	62.933	2,541	15

*originalmente identificados com anel único

Tabela 10- Anéis de Urano e Netuno (Adaptado de *Journey through the Galaxy*; <http://filer.case.edu/~sjr16/advanced/index.html>).

pelo anel principal e halo. Ele é dividido em duas partes: Anel Tênuê Andrasteia, associada ao satélite Andrasteia, e Anel Tênuê Tebe, associada ao satélite Tebe. O limite externo deste anel está a 222.000 km do centro de Júpiter.

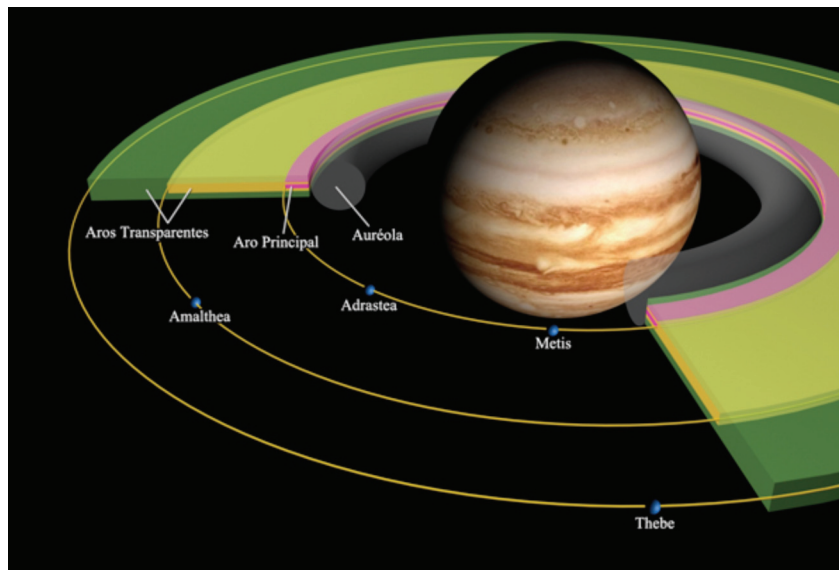
Embora haja suspeitas de que Sir William Herschel, que descobriu Urano em 1781, tenha suspeitado da existência de um anel em 1789, os anéis foram descobertos em 1977, com a observação da ocultação de uma estrela pelo planeta. O brilho dessa estrela variou rapidamente pouco antes e pouco depois da ocultação. Isto era um indicativo de que algo estava bloqueando parte da luz dessa estrela. Eram os anéis. Posteriormente foram encontrados mais quatro anéis, dois pela sonda Voyager 2 e dois pelo telescópio espacial Hubble.

Até o momento são treze anéis. Em ordem crescente de distância de Urano, eles são designados 1986U2R/ζ (38.000 km de raio), 6, 5, 4, α, β, η, γ, δ, λ, ε, μ (98.000 km de raio) e ν. Eles são tão escuros como carvão (refletem apenas 2% da luz incidente), provavelmente compostos de gelo contaminado com material orgânico.

Soubemos da existência de anéis em Netuno em 1989, quando a sonda Voyager 2 passou pelo planeta. Eles são tênues e constituídos de poeira, como os de Júpiter. São cinco anéis: Galle, Le Verrier, Lassell, Arago e Adams. Há outro anel bem mais tênue posicionado na órbita do satélite Galateia.

Os anéis netunianos também são muito escuros e contaminados por material orgânico. O anel Adams é dividido por cinco arcos discretos (Fraternidade, Igualdade 1 e 2, Liberdade 1 e 2, e Coragem).

Provavelmente, anéis planetários são criados quando satélites pequenos colidem entre si ou são desintegrados ao se aproximarem demais do planeta. Os fragmentos desses satélites passam a orbitar os planetas, cada qual com sua órbita. Colisões posteriores repetidas acabam pulverizando ainda mais os fragmentos, eventualmente formando um conjunto de anéis. Impactos de meteoroides nas



24- Representação gráfica dos anéis de Júpiter. As órbitas dos satélites mais internos estão representadas por linha contínua.

Nome	Cometa	Ocorrência
Eta Aquáridas	1P/Halley	início de maio
Perseidas	109P/Swift-Tuttle	meados de agosto
Dracônidas	21P/Giacobini-Zinner	início de outubro
Leônidas	55P/Tempel-Tuttle	meados de novembro

Tabela 11- Chuvas de meteoros mais conhecidas.

superfícies dos satélites mais próximos dos planetas também produzem poeira que acaba alimentando o sistema de anéis. Acredita-se que sistemas de anéis sejam fenômenos transientes, que duram algumas centenas de milhões de anos. Casos como o de Saturno devem ser raros.

• Meteoroides (Fragmentos Rochosos)

Pelo espaço interplanetário vagam fragmentos rochosos, com tamanhos entre 0,1 mm e 10 m, genericamente denominados meteoroides. Um objeto maior que 10 m é considerado asteroide, e menor que 0,1 mm é considerado grão de poeira (ou micrometeoróide).

Ao cair na Terra o meteoróide sofre atrito com os gases atmosféricos, é parcialmente vaporizado e produz um rastro luminoso denominado meteoro (a popular estrela cadente). Um fenômeno muito comum é o chuveiro (ou chuva) de meteoros, que pode apresentar até milhares de meteoros por hora. Os traços luminosos parecem provir de uma direção específica do céu, chamada radiante. Na realidade é um fenômeno de perspectiva, semelhante ao que ocorre quando vemos os trilhos de uma linha de trem encontrar-se no infinito. O chuveiro de meteoros recebe o nome da constelação onde estiver seu radiante, por exemplo: Aquáridas (Aquário), Perseidas (Perseu), Dracônidas (Dragão) e Leônidas (Leão). Geralmente, essas chuvas estão associadas a cometas. Particularmente, as mencionadas acima estão, respectivamente, associadas aos cometas Halley, Swift-Tuttle, Giacobini-Zinner e Tempel. A razão dessa associação é a seguinte: parte da poeira ejetada pelos cometas permanece em movimento orbital ao redor do Sol, na órbita do cometa. Quando a Terra cruza a órbita de um desses cometas, ou passa muito próximo dela,



25- Chuva de meteoros Leônidas, vista em 2001
(Tago, Shusaku. http://tagoshu.cool.ne.jp/astro_photos/phenomena/leonids2001-e.html).

essa poeira cai na Terra produzindo uma chuva de meteoros. Portanto, este é um fenômeno periódico.

Corpos grandes produzem meteoros muito mais intensos, com enormes rastros de fumaça e ruído sonoro intenso, denominados bolas de fogos ou bólidos. Um destes fenômenos ocorreu às 10h30 do dia 12/02/1947, na Sibéria, perto da cadeia montanhosa Sikhote-Alin. No local da queda foram encontradas várias crateras, com diâmetros entre 1 m e 30 m, e fragmentos constituídos basicamente de ferro.

Os meteoroides que sobrevivem à passagem pela atmosfera, atingem o solo e passam a ser chamados meteoritos. Geralmente, a queda de um meteoróide grande produz uma cratera imensa, mas podem ocorrer casos de desintegração explosiva antes de o meteoróide atingir o solo. Este foi o caso de Tunguska, região inóspita da Sibéria, onde toda uma região florestal foi devastada na manhã de 30/06/1908. Este fenômeno foi mais violento que o de Sikhote-Alin. A poeira produzida pela queda se dispersou pela atmosfera onde permaneceu por várias semanas. A luz solar refletida pela poeira clareava as noites, numa extensão vasta que ia das montanhas do Cáucaso até as ilhas Britânicas. Nenhum fragmento foi encontrado no solo.

A extinção dos dinossauros, ocorrida há 65 milhões de anos, entre o Cretáceo e o Terciário, pode ter relação com a queda de um asteroide de 10 km na península de Yucatán (México), que produziu uma cratera de 180 km de diâmetro. A maior extinção em massa conhecida, que fez desaparecer 96% das espécies marinhas, 50% das famílias existentes em terra e desaparecimento total das trilobites (artrópodes marinhos que viveram exclusivamente nos mares do Paleozoico, entre 542-251 Ma), ocorreu no final do período Permiano, há 250 milhões de anos. Uma cratera de impacto com cerca de 480 km de diâmetro na Terra de Wilkes, na Antártida, pode estar associada a essa extinção.

De acordo com a composição química, os meteoritos podem ser classificados em três grupos básicos: metálicos, ferropétreos e rochosos (ver tabela 12). Os meteoritos metálicos, também denominados ferrosos ou sideritos, são constituídos de uma liga de ferro (90 a 95%) e níquel (5 a 10%). A aparência externa destes meteoritos lembra restos de ferro siderúrgico, com superfície arredondada (moldada pela fusão atmosférica), e às vezes com depressões que se parecem com marcas de dedo em barro. Internamente, a aparência é de ferro com traços de níquel (figura 26). Eles são fortemente atraídos por imã. Após um tratamento adequado, eles apresentam estruturas retilíneas (figuras de

Tipo	Classe	Subclasse	Abundâncias (%)
Metálicos (sideritos)			4
Féropétreos (siderólitos)			1
Rochosos (pétreos)	Acondritos		9
	Condritos	Carbonáceos	5
		Ordinários	81

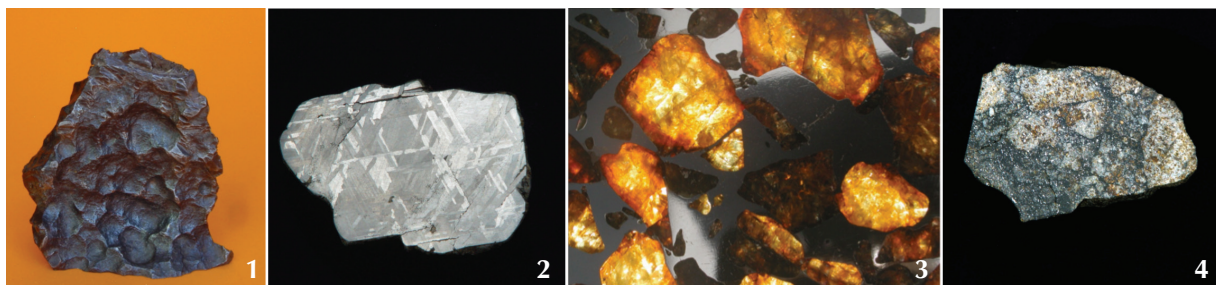
Tabela 12- Classificação básica dos meteoritos em grupos e subgrupos.

Widmanstätten) que se formam em ambientes de alta pressão e resfriamento muito lento, típicos de núcleo de grandes corpos diferenciados, como os planetas.

Os meteoritos ferropétreos, ou siderólitos, formam o grupo minoritário. Eles são formados de silicatos e da mistura de ferro e níquel, em proporções comparáveis. Externamente se parecem com rocha ordinária, mas internamente apresentam cristais escuros e arredondados de olivina (grupo de minerais silicáticos do tipo Mg_2SiO_4 , Fe_2SiO_4 , e outros) incrustados em uma matriz clara de ferro-níquel (figura 26).

Os meteoritos rochosos, ou pétreos, aparentam as rochas terrestres. Os acondritos lembram as rochas ígneas (basalto vulcânico) que sofreram fracionamento, ou seja, constituídas de diferentes fragmentos rochosos cimentados por uma matriz de composição homogênea (figura 26). Os condritos se diferenciam das rochas terrestres pela presença de côndrulos, pequenas esferas de rochas fundidas a altas temperaturas e solidificadas (figura 26). Em idade, estes meteoritos são contemporâneos ao Sol (4,6 bilhões de anos). Os condritos carbonáceos apresentam inclusões ricas em cálcio e alumínio, também solidificadas a altas temperaturas, ambas incrustadas numa matriz formada de silicatos hidratados, condensados a baixas temperaturas. A cor escura dessa matriz se deve à presença de compostos orgânicos, inclusive aminoácidos. Isto significa que essa matriz jamais sofreu aquecimento superior a 200K. Portanto, fica evidente que os materiais que formam este tipo de meteorito tiveram origens diferentes e foram agregados num corpo único. Os condritos ordinários não apresentam minerais hidratados, nem compostos orgânicos. A matriz é formada por minerais de alta temperatura de fusão, mais clara, não apresenta inclusões de cálcio e alumínio, e assemelha-se aos côndrulos. Na amostragem de meteoritos, eles representam a maioria.

A análise comparativa da composição química nos permite associar os meteoritos corpos parentais. Os meteoritos sideritos estão associados aos asteroides tipo M; os ferropétreos associam-se aos asteroides tipo S; os condritos ordinários têm composição química semelhante a dos mantos e crostas dos planetas telúricos; os condritos carbonáceos assemelham-se aos asteroides tipo C; e os acondritos se parecem muito com material encontrado na Lua e em Marte.



26- Meteoritos: [1] Pirapora (MG) – siderito; [2] Itutinga (MG) – figuras de Widmanstätten; [3] Imilac (Chile) – siderólito; [4] Paranaíba (MS) – pétreo / condrito. Créditos: [1], [2] e [4] – Maria Elizabeth Zucolotto – Museu Nacional – UFRJ; [3] Fotografia de Geoffrey Notkin, Aerolite Meteorites, www.aerolite.org. Imagens fora de escala.

5.9 ESTRUTURA E FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

5.9.1 A ESTRUTURA

O Sistema Solar é composto de uma estrela, oito planetas, cinco planetas-anões (número que deve crescer), centenas de satélites, milhares de asteroides e centenas de milhões de cometas, além de rocha e poeira interplanetária. Toda essa matéria mantém-se unida pela força gravitacional do Sol, o componente maior.

Podemos dizer que a massa do Sistema Solar está concentrada no Sol. Ele retém 99,8% da massa total, sendo 70,9% de hidrogênio, 27% de hélio e 2,1% de outros elementos químicos. Ou seja, o Sistema Solar é predominantemente gasoso. Essa proporção de massa entre estrela e sistema planetário é regra. Um megaplaneta tem cerca de treze vezes a massa de Júpiter, ou 1,2% da massa do Sol. Para gerar energia por fusão nuclear uma estrela deve ter no mínimo cerca 8% da massa solar.

O Sol não é apenas o objeto mais maciço do Sistema Solar, ele é também o maior e o mais quente. Considerando a fotosfera como o limite aparente do Sol, ele tem 1.400.000 km de diâmetro e 5.600 K de temperatura. A massa do Sol (2×10^{33} kg) é grande, assim como seu volume, por isso a densidade solar é baixa, 1,4 g/cm³, apenas 40% maior que a da água.

A região do plano da eclíptica contida no raio de até cerca de 4 UA do centro do Sol é dominada por objetos rochosos. Nela há quatro planetas, um planeta anão (Ceres) e milhares de asteroides. O planeta mais próximo do Sol, Mercúrio, é também o menor do Sistema Solar. Vênus e Terra são muito parecidas em tamanho, massa e composição química, mas bem diferentes em condições ambientais. Vênus é muito mais quente e sua atmosfera é bem mais densa. Marte tem tamanho intermediário entre Mercúrio e Terra (ou Vênus). Sua distância média do Sol é uma vez e meia a da Terra, a gravidade em sua superfície é um terço da terrestre, ele é bem mais frio e a pressão atmosférica na superfície é 90 vezes menor que a terrestre. Destes quatro planetas, só a Terra tem água em abundância e nos três estados físicos (sólido, líquido e gasoso).

Entre Marte e Júpiter, há um cinturão de corpos rochosos de tamanhos e formas variadas, os asteroides. As densidades variam entre 2,3 g/cm³ (tipo argila) até 7,7 g/cm³ (liga ferro-níquel). A

análise comparativa entre as densidades determinadas pela composição química e pela dinâmica (gravitação) permite dividi-los em três grupos gerais: (1) essencialmente sólidos, (2) com cerca de 20% de porosidade, e (3) com mais de 30% de porosidade. Os mais hidratados, isto é, ricos em água, podem conter até 1% da massa em água. Grandes asteroides como Pallas e Vesta, podem conter grande quantidade de água.

A região entre 5 UA e 31 UA do Sol é povoada pelos planetas gasosos e seus satélites, e por famílias de cometas de curto período. Por similaridades de tamanho e composição química, podemos separá-los em duas duplas: Júpiter e Saturno, os maiores, e Urano e Netuno. A massa de Júpiter é maior que a soma das massas dos outros planetas do Sistema Solar.

Júpiter e Saturno são constituídos essencialmente de hidrogênio e hélio, o que lhes dá um caráter de gigantes gasosos. Proporcionalmente, Urano e Netuno têm gases mais densos, por isso são chamados, por vezes, de gigantes congelados. Os topos das nuvens desses planetas são sob temperaturas extremamente baixas: -145°C em Júpiter (5,2 UA), -175°C em Saturno (9,5 UA), -210°C em Urano (19,3 UA) e -220°C em Netuno (30,2 UA).

Devidos às massas elevadas, Júpiter e Saturno apresentam maior abundância de satélites; cerca de seis dezenas cada um. Ganimedes (Júpiter) e Titã (Saturno) são maiores que Mercúrio. Io (Júpiter) é o corpo de maior atividade vulcânica do Sistema Solar e Titã tem atmosfera mais densa que a terrestre. Os demais satélites têm superfícies congeladas e são ricos em água.

Urano e Netuno, menos massivos, têm menos satélites. Urano tem quatro satélites pouco superiores a 1.000 km de diâmetro: Ariel, Umbriel, Titânia e Oberão. Netuno tem apenas um satélite grande, Tritão, que é do tamanho de Plutão.

A região transnetuniana é vasta e pouco conhecida. O objeto mais famoso dessa região é Plutão, até pouco tempo classificado como planeta. Ele e seus vários pequenos corpos orbitam o Sol praticamente na mesma trajetória, formando a família dos plutinos. Há várias outras famílias de pequenos corpos que povoam aquela região. Estes objetos todos estão dentro do Cinturão de Edgeworth-Kuiper, entre 30 UA e 50 UA, que é bem mais extenso e massivo que o cinturão principal dos asteroides. Os objetos desse cinturão são compostos de rocha, gelo e gases congelados, sobretudo hidrocarbonetos e amônia, e têm períodos orbitais da ordem de duas centenas de anos. São muito ricos em água.

Os tamanhos são diversificados, assim como as órbitas. Até o momento há quatro planetas-anões nessa região, mas a quantidade exata é desconhecida. Eris tem órbita bastante alongada, seu afélio atinge 100 UA. Sedna, um objeto com praticamente a metade do tamanho de Eris, tem afélio bem mais distante, cerca de 970 UA. Os corpos mais numerosos desta região são os menores que 100 km de diâmetro. Não sabemos exatamente quantos são, mas devem ultrapassar milhões. Os cometas de períodos curtos e médios fazem parte desta população.

A massa total encerrada no Cinturão de Edgeworth-Kuiper pode ser menor que a da Terra. A temperatura local é da ordem de 50 K (-223 °C). Até as imediações desta região, a distribuição dos corpos ocorre praticamente no plano da eclíptica, as inclinações em relação a este são pequenas. Para distâncias heliocêntricas bem maiores, acima de alguns milhares de UA, a distribuição dos corpos começa a se tornar gradativamente esférica e espessa.

Entre cerca de 30.000 UA e 100.000 UA, cometas orbitam o Sol na Nuvem de Oort. Portanto, podemos admitir o limite externo da Nuvem de Oort como região limítrofe do Sistema Solar. Mesmo sendo grande, essa distância equivale a um terço da distância da estrela Próxima Centauro, a mais próxima do Sol.

5.9.2 A FORMAÇÃO

Todo o Sistema Solar nasceu de uma mesma nuvem primitiva de gás e poeira, há cerca de 4,6 bilhões de anos. O processo físico pelo qual se formou deve ser o mesmo que predomina no nascimento de uma estrela.

Uma teoria satisfatória deve explicar as propriedades dinâmicas e físicas do Sistema Solar. As principais são as seguintes: (1) os sentidos de revolução e de rotação dos planetas (exceto Vênus) e da maioria dos satélites coincidem com o sentido de rotação do Sol; (2) as órbitas dos planetas (exceto Mercúrio) são quase circulares e praticamente coplanares à eclíptica; (3) as órbitas da maioria dos satélites também são quase circulares e coplanares ao equador dos seus planetas; (4) as distâncias heliocêntricas dos planetas, assim como as distâncias orbitais dos satélites, seguem uma lei de espaçamento regular; (5) juntos, os planetas apresentam momento

angular¹ bem maior que o do Sol; (6) os cometas de períodos longos apresentam órbitas com excentricidades e inclinações diversas, ao contrário dos cometas de períodos curtos e dos demais corpos do Sistema Solar; (7) os planetas gigantes apresentam anéis; (8) adiante de Netuno há uma população de corpos pequenos com características diversificadas; (9) os planetas apresentam composição química diferenciada, relacionada com a distância heliocêntrica.

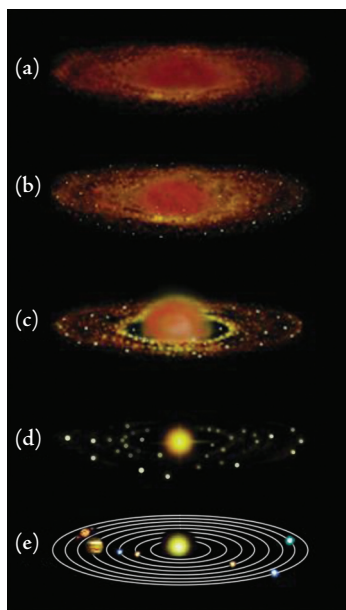
Longe de serem fortuitas, estas características decorrem do processo de formação. A primeira tentativa de explicação foi apresentada por René Descartes em 1644, antes de Isaac Newton formular a teoria da gravitação. Essa teoria foi aperfeiçoada por Immanuel Kant (1775) e Pierre-Simon de Laplace (1796). Entretanto, os avanços mais significativos surgiram apenas no século passado, graças ao aprimoramento da instrumentação astronômica, incluindo a espacial, e ao desenvolvimento teórico dos modelos de estrutura e evolução estelar.

Como todas as estrelas, o Sol surgiu da contração de uma nuvem fria de gás e poeira, referenciada como Nebulosa Solar Primitiva (NSP) (figura 26). Durante a contração, um embrião do Sol, o proto-Sol, formava-se no centro da NSP. Sua temperatura era bem menor que a atual e ele emitia radiação infravermelha. Quanto mais a nuvem se contraía, mais rapidamente ela girava. Essa rotação provocava a formação de um disco de matéria na região equatorial do proto-Sol². Esse sentido de rotação da nuvem é o que predominou no Sistema Solar.

Os corpos rochosos cresceram gradativamente, acumulando matéria através de colisões. Este processo, conhecido por acreção. No princípio as colisões ocorriam entre grãos, que, aos poucos, iam se tornando aglomerados maiores até formarem planetesimais, corpos maiores que 1 km de diâmetro. À medida que a massa aumentava, a gravidade do corpo atuava com mais intensidade. Isto acelerava ainda mais o acúmulo de matéria. Nesta fase, as colisões se tornavam cada vez mais violentas. Parte das crateras formadas nas colisões ainda permanece exposta nas superfícies de planetas e satélites. Estes corpos se for-

1. Quantidade de movimento angular = mvr , onde m é massa, v é velocidade orbital e r é raio.

2. A relação entre contração e rotação decorre do princípio de conservação do momento angular. De acordo com as leis de movimento de Newton o momento angular de qualquer objeto deve permanecer constante antes, durante e depois de uma mudança física. Em outras palavras, se a distância r diminui então a velocidade v deve aumentar pois o produto mvr é constante, ou seja, ele se conserva.



26- Na contração da Nebulosa Solar Primitiva, o Sol formou-se no centro da nuvem. Os planetas e seus satélites foram formados a partir da matéria do disco circunsolar (J.K.Beathy, 1981).

maram perto do Sol, uma região quente em que predominava a composição química típica dos rochosos.

Os planetas gasosos podem ter se formado por processo diferente, denominado instabilidade de disco. Ele se parece mais com o processo de formação das estrelas. Essa instabilidade gravitacional no disco de matéria provoca o surgimento de grandes bolhas de gás, que acumulam matéria com muita rapidez. Este processo pode ser mil vezes mais rápido que o de acreção. A região onde se formaram os planetas gigantes era mais fria e composta predominantemente por gases. Júpiter e Saturno são compostos essencialmente de hidrogênio e hélio, como o Sol. Como grandes massas implicam em campos gravitacionais intensos, estes planetas acumularam muitos satélites.

A matéria que não foi acrescentada aos planetas e satélites ficou concentrada nos asteroides e cometas. A maior parte dos asteroides permaneceu no cinturão principal de asteroides.

A região diante de Netuno concentra a maior parte da sobra de material. Os planetesimais que não se agregaram aos planetas permaneceram nessa região como objetos transnetunianos, alguns concentrados no Cinturão de Edgeworth-Kuiper, outros espalhados pela região em órbitas muito alongadas (alta excentricidade) e outros, ainda, na Nuvem de Oort. Os cometas de curto e médio período foram formados nessa região e lá permaneceram em órbitas quase coplanares com a eclíptica. Já os cometas de longo período teriam se formado nas imediações dos planetas gigantes, mais próximos do Sol, e lançados para os confins do Sistema Solar por consequência de interações gravitacionais. Assim teria se formado a Nuvem de Oort, com sua configuração esférica.

5.10 SISTEMAS PLANETÁRIOS EXTERNOS (EXOPLANETAS OU PLANETAS EXTRASSOLARES)

5.10.1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de existência de outros locais que pudessem abrigar vida, planetas girando em torno de outros "sóis", tem sido questionado há séculos. No século V a.C. os gregos Leucipo de Mileto e, posteriormente, seu discípulo Demócrito de Abdera desenvolveram uma teoria sobre a constituição da natureza, chamada "atomismo". Segundo ela, o todo, isto é, a realidade, se compõe de partículas indivisíveis de natureza idêntica, os "átomos", e de vácuo. Leucipo dizia: "Assim surgem os mundos.

Corpos de todos os tamanhos e formas movem-se do infinito em um grande vácuo; lá eles juntam-se, rodopiam e formam um único vórtice, uns colidindo com outros, revolvendo de todas as maneiras, e começam a separar-se uns dos outros”.

Na história mais recente, em meados do século 18, o filósofo alemão Emmanuel Kant (1724-1804) considerava como provável que alguns daqueles objetos difusos, na época identificados por “nebulosas”, como Andrômeda, seriam grandes concentrações de estrelas. Ele as via como outros universos e as denominou “universos-ilhas”.

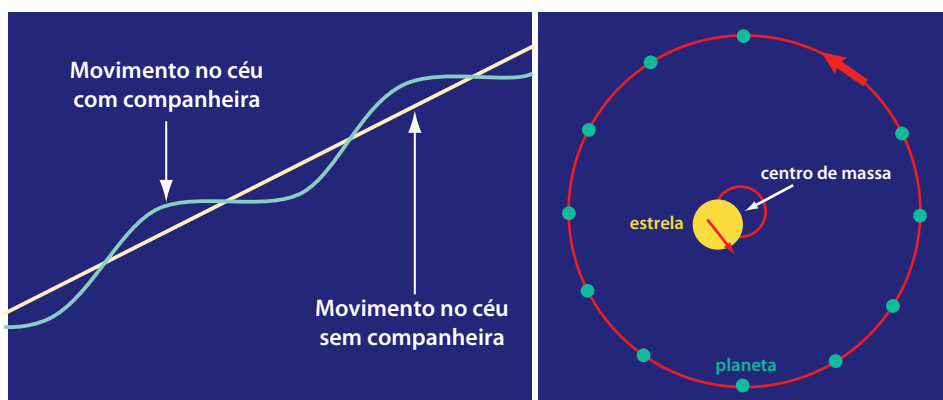
Porém, somente após a década de 1920, com a discussão do tamanho da Via Láctea, é que nos conscientizamos das dimensões reais do Universo. Ele é bem maior do que pensávamos até então e estava povoado de galáxias repletas de estrelas, possivelmente rodeadas por planetas. Despontava, assim, a possibilidade de o Universo ser povoado de planetas.

Para que este raciocínio tivesse fundamento era necessário saber se a formação de planetas era um evento comum, decorrente do processo de formação de uma estrela. Como vimos, a primeira proposta teórica de formação de planetas foi formulada pelo próprio Emmanuel Kant. Os detalhes desse processo só foram revelados mais recentemente, pelas pesquisas em formação estelar.

Uma característica importante desse processo é a possibilidade de formação de sistemas planetários com configurações bem diferentes do Sistema Solar. Na realidade, a configuração do sistema planetário solar é uma das inúmeras possibilidades. Sistemas com planetas bem maiores que Júpiter bem mais próximos de suas estrelas parecem comuns.

A primeira procura sistemática de exoplanetas foi feita por Christian Huygens (1629-1695), documentada no final do século 17. Porém, pode-se dizer que o início das pesquisas mais consistentes deu-se apenas no começo do século passado.

Em 1916, o astrônomo americano Edward Emerson Barnard descobriu que uma estrela pequena e avermelhada da constelação do Ofiúco, visível com auxílio de telescópio e distante de nós cerca de 6 a.l., bamboleava em torno de uma determinada posição. Essa estrela ficou conhecida como “estrela de Barnard”. Esse é o comportamento que se espera quando a estrela tem ao seu redor um ou mais corpos de massa significativa. A interação gravitacional entre os corpos força-os a girar em torno do baricentro (centro de massa) desse sistema. O Sol também apresenta um bamboleio por conta da presença dos demais corpos do Sistema Solar.



27- O movimento da estrela no espaço (à esquerda) e o corrigido.

A história desta estrela começa a ser desvendada cerca de quatro décadas mais tarde, quando o astrônomo holandês Peter van de Kamp (1901-1995) concluiu a análise das quase duas mil placas fotográficas da estrela de Barnard. Seus cálculos sugeriam a presença de um planeta, com massa equivalente a 1,6 a massa de Júpiter ($1,6M_J$), girando em órbita elíptica. O refinamento desses cálculos durante décadas levaram van de Kamp a concluir em 1982 que havia dois planetas, com massas de $0,7 M_J$ e $0,5 M_J$. Esses planetas jamais foram confirmados. Observações astrométricas posteriores, feitas com instrumentação mais potente, não confirmaram o bamboleio. De qualquer forma esse caso continua sob investigação.

A primeira confirmação de um exoplaneta ocorreu em 1995, ano em que van de Kamp morreu. Esse planeta foi encontrado junto à estrela 51 da constelação Pégaso. Desde então, as técnicas de observação e os instrumentos evoluíram muito. Atualmente as observações são feitas com instrumentação diversificada, variando de pequenos telescópios até satélites espaciais.

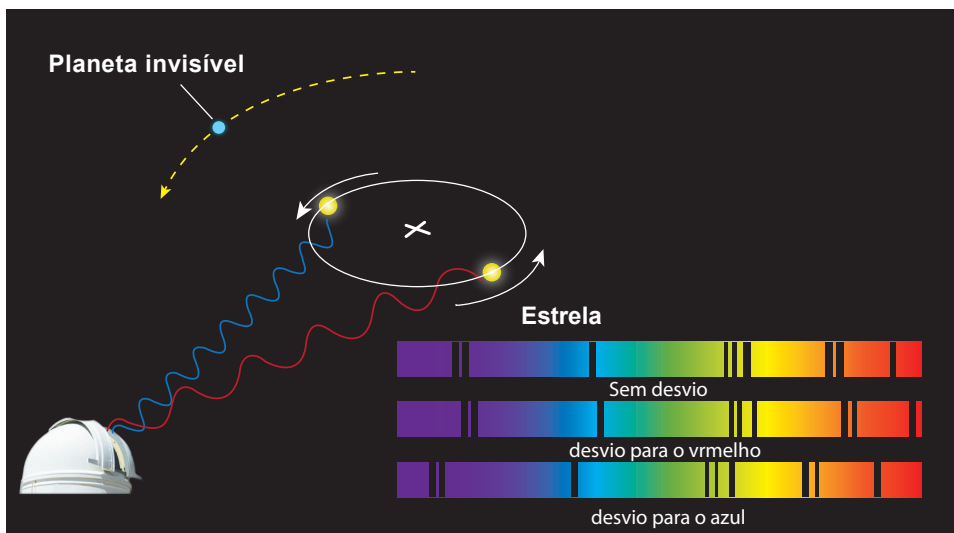
5.10.2 AS TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO E OS EXOPLANETAS CONHECIDOS

As técnicas de observação para a busca de exoplanetas são indiretas. Na realidade, procura-se pelos efeitos que esses planetas causam em suas estrelas. As principais técnicas são astrometria, velocidade radial, fotometria e imageamento.

Pela Lei da Gravitação Universal de Newton, a força gravitacional entre estrela e planeta é proporcional ao produto das massas dos dois objetos e inversamente proporcional à distância ao quadrado do planeta à estrela. Isto significa que estrela e planeta descrevem órbitas em torno do centro de gravidade comum desse sistema, com um mesmo período. Quanto maior a massa do planeta, ou menor a distância entre os dois corpos, maior será a força de atração gravitacional e o efeito produzido no movimento da estrela. Esse movimento da estrela afeta principalmente a posição aparente da estrela e sua velocidade radial (velocidade aparente na direção da linha de visada).

• Técnica Astrométrica

Esta técnica avalia as alterações nas posições aparentes das estrelas, decorrentes da presença de planetas em seu entorno. Esse movimento aparente pode ser mensurado depois de se descontar os movimentos da Terra e da própria estrela pelo no espaço. Geralmente a posição aparente da estrela



28- Desvio espectral decorrente do movimento da estrela em torno do centro de massa, provocado pela presença de um planeta.

descreve uma pequena elipse em torno do centro de gravidade do sistema. Quanto mais distante estiver o sistema planetário, mais difícil será a percepção do movimento da estrela.

O movimento elíptico da estrela é, então, analisado com base na teoria da gravitação. As equações envolvem as massas da estrela e do(s) planeta(s) e permitem obter o período do movimento. Quanto mais planetas existirem em torno da estrela, mais complicada é a análise.

• Técnica da Velocidade radial

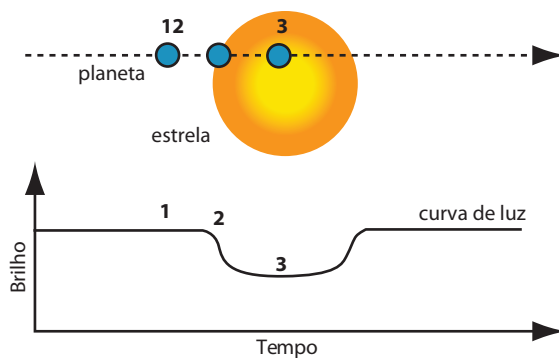
Esta técnica permite medir variações na velocidade radial. Velocidade radial é a rapidez com que a estrela move-se ao longo da linha de visada (linha imaginária que une observador e estrela). Na realidade a estrela move-se pelo espaço em uma direção determinada. Uma componente desse movimento é vista no plano do céu como deslocamento de posição aparente. A outra parte manifesta-se na direção da linha de visada e provoca alteração no comprimento de onda da luz da estrela, fenômeno conhecido como efeito Doppler. Quando o objeto se afasta do observador, sua luz torna-se avermelhada (por conta de um aumento no comprimento de onda). No caso oposto, a luz torna-se azulada (diminui o comprimento de onda). Esse efeito é sutil, mas mensurável. A medida se faz através do espectro de luz do objeto. O movimento da estrela em torno do centro de gravidade provoca efeito Doppler, porque ora a estrela move-se na direção oposta a do observador, ora na direção deste. A velocidade assim determinada e as leis de dinâmica de Newton permitem estimar as massas dos planetas, o tamanho das órbitas e os períodos.

• Técnica Fotométrica

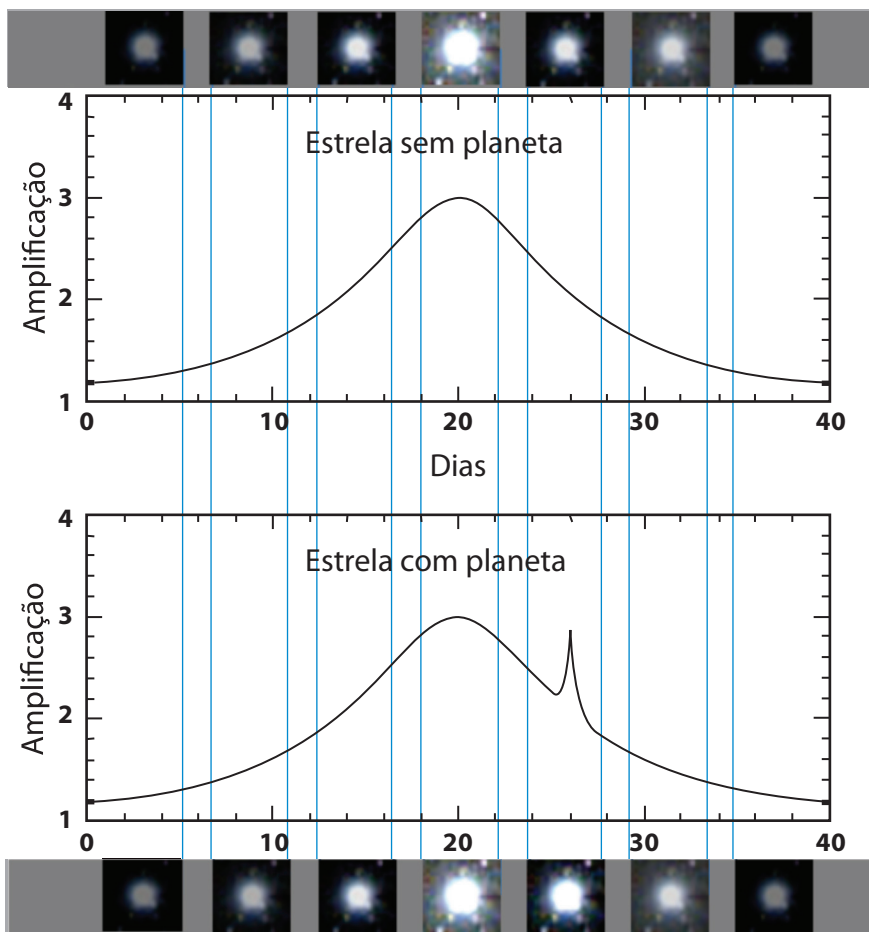
Esta técnica permite medir variações sutis de brilho da estrela, absolutamente imperceptíveis ao olho humano, provocadas pela presença dos planetas. Basicamente, há dois métodos para esta técnica: trânsito e microlente.

• Método de Trânsito

Quando um planeta transita na frente da estrela ele bloqueia uma pequena parcela de sua luz. Se o plano orbital do planeta estiver quase paralelo à linha de visada, isto é, se estiver sendo visto de perfil, o planeta se interpõe entre a estrela e a Terra, bloqueando parte da luz da estrela. Repetidos

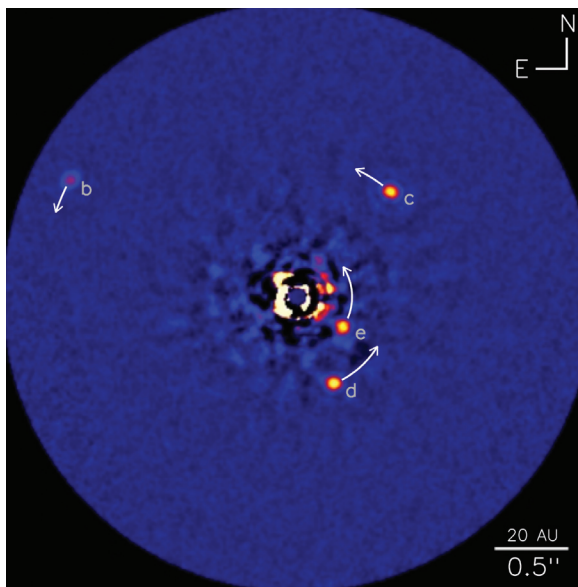


29- Durante o trânsito, o planeta bloqueia parte da luz e o brilho da estrela decai.



30- A curva de amplificação da luz de uma estrela com planeta apresenta um pico quando o planeta transita a estrela.

31- Três planetas são vistos em torno da estrela HR 8799 (disco escuro). A imagem obtida na luz infravermelha foi devidamente tratada para evidenciar os planetas (Observatório Gemini - <http://www.gemini.edu/node/11151>).



trânsitos provocam variação periódica da luz dessa estrela. Os períodos entre os picos de máximo ou de mínimo de luz representam o período orbital do planeta.

• Método de microlente gravitacional

O efeito de microlente gravitacional, previsto por Einstein, ocorre quando duas estrelas se alinham na mesma direção. Neste caso, a estrela mais próxima atua como uma lente aumentando o brilho da estrela mais distante. É um evento raro, mas quando acontece o alinhamento pode durar dias ou semanas. Além disso, esse evento não é repetitivo.

Se a estrela mais próxima tiver planeta, o campo gravitacional desse planeta vai intensificar a variação de brilho da estrela de fundo.

• Imageamento

Ainda não dispomos de instrumentação potente o suficiente para fotografar planetas em torno de estrelas, na luz visível. Isto porque a luz refletida pelo planeta é pelo menos um bilhão de vezes mais fraca que a luz emitida pela estrela, além do que, pela distância, ele aparece muito próximo da estrela. Este problema pode ser minimizado quando o imageamento é feito na luz infravermelha. A diferença de brilho entre estrela e planeta diminui porque o planeta brilha muito mais nessa faixa do espectro e a estrela bem menos.

A primeira fotografia surgiu em 2004, mostrando um objeto aproximadamente cinco vezes mais maciço que Júpiter, em torno de uma anã-marrrom. A distância do planeta à estrela é quase a mesma de Plutão ao Sol.

Em outubro de 2007, foi liberada a primeira imagem de uma estrela e seu sistema planetário, onde se veem três planetas (figura 31). A estrela HR 8799 é mais jovem que o Sol, tem cerca de uma vez e meia sua massa do Sol e luminosidade cinco vezes maior que a solar. Os planetas têm massas entre sete e dez vezes maior que a de Júpiter e orbitam a estrela a 25, 40 e 70 UA. Comparando com o Sistema Solar, o planeta mais distante estaria no cinturão de Edgeworth-Kuiper. Os planetas e a estrela se formaram há 60 milhões de anos.

5.10.3 EXOPLANETAS CONHECIDOS

As descobertas de novos exoplanetas crescem rapidamente, tornando impossível manter atualizada

PLANETA			ESTRELA	
Massa (M_J)	Tamanho (R_J)	Distância da estrela (UA)	Massa (M_S)	Idade comparada à do Sol
1% < 1 1% $\approx$ 1 10% de 9,1 a 10,4 20% de 10,5 a 11,7 50% de 11,7 a 13	24% menores 33% da ordem 43% maiores	4% < 0,4 10% $\approx$ 1 14% < 3 31% de 3 a 9 55% > 9	4% < 1 8% $\approx$ 1 61% de 1 a 3 21% de 3 a 4 5% de 4 a 4,5	21% mais jovens 23% idade solar 56% mais velhas

Tabela 13- Parâmetros físicos de exoplanetas, com massa de até vezes a de Júpiter, e suas estrelas. M_J e R_J são, respectivamente, massa e raio de Júpiter, e M_S é massa do Sol. Estatística baseada nos exoplanetas conhecidos até dezembro de 2010.

qualquer tabela impressa. Neste caso, a melhor opção é consultar diretamente a página da Enciclopédia de Planetas Extrassolares (<http://exoplanet.eu/index.php>).

Até janeiro de 2010, eram conhecidos 429 planetas, distribuídos em 363 sistemas planetários, dos quais, 45 são sistemas múltiplos (têm mais de um exoplaneta). Na amostragem da Enciclopédia de Planetas Extrassolares são incluídos objetos com massa superior a 13 vezes maior que a de Júpiter, limite de massa de um megaplaneta. Considerando essa divisão, da amostragem de exoplanetas conhecidos, 410 são exoplanetas e 19 são objetos com massa entre 13 e 25 vezes maior que Júpiter, conhecidos como anãs-marrons.

A grande maioria dos exoplanetas foi descoberta por técnica astrométrica ou de velocidade radial. Todos os exoplanetas são maiores que a Terra, a maioria é maior que Júpiter. A maioria deles está a distâncias que equivalem à região entre Marte e Saturno do Sistema Solar.

CAPÍTULO 6

Sol

Vera Jatenco-Pereira

6.1 O ESTUDO DO SOL ATRAVÉS DA HISTÓRIA

6.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

6.3 A ESTRUTURA DO SOL

6.3.1 FOTOSFERA

- Espectro de Absorção

- Granulação

- Borda do Sol

- Manchas Solares

6.3.2 CROMOSFERA

- Espectro

- Atividade cromosférica

6.3.3 REGIÃO DE TRANSIÇÃO

6.3.4 COROA SOLAR

6.4 ATIVIDADE SOLAR

6.4.1 MANCHAS SOLARES E O CICLO DE 11 ANOS

6.4.2 CAMPO MAGNÉTICO GERAL E O CICLO MAGNÉTICO

6.4.3 CENTROS DE ATIVIDADE

6.5 VENTO SOLAR

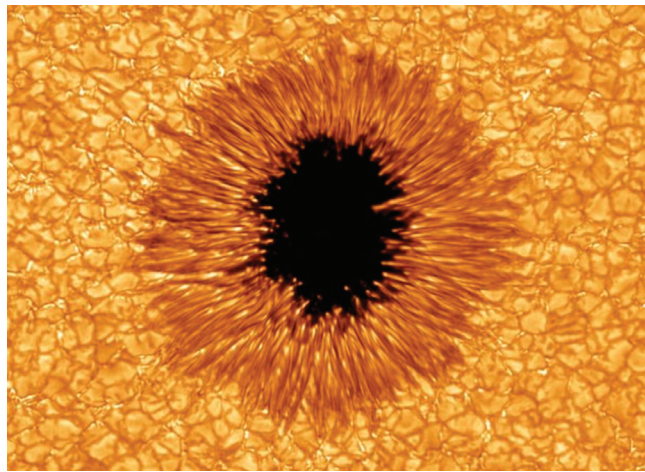
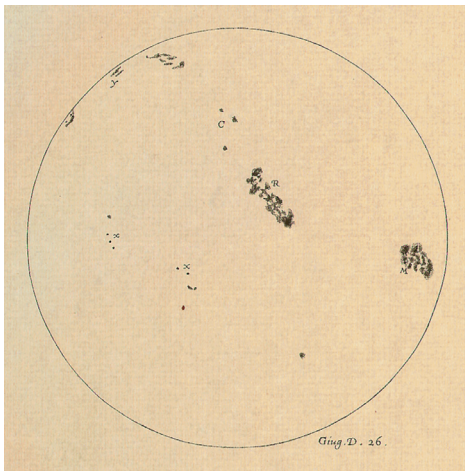
Sem o Sol o Sistema Solar não existiria. Mas o Sol também é uma estrela e de tipo bem definido. Ele exibe algumas semelhanças com outras estrelas da Galáxia, ao mesmo tempo em que se diferencia de inúmeras outras. Com base nisso, podemos analisar o Sol sob dois pontos de vista: como componente do Sistema Solar, considerando apenas suas características mais gerais. E, também, sua interação com a Terra e demais corpos do Sistema Solar.

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. A quantidade de luz solar por unidade de área no topo da atmosfera terrestre define a constante solar, de aproximadamente 1.368 W/m^2 . Considerando toda a superfície, a cada segundo a Terra recebe $50.000.000 \text{ GW}^1$ do Sol. Parte dessa energia é atenuada pela atmosfera. Em dia de céu livre de nuvens, com o Sol no zênite, ou seja, sobre a cabeça de um observador, a potência incidente é aproximadamente 1.000 W/m^2 .

A energia solar pode ser coletada por uma variedade de processos sintéticos e naturais. Essa energia é indispensável para a manutenção da biosfera e da água nos três estados, especialmente no líquido e no gasoso. A energia solar também pode ser captada direta ou indiretamente do Sol. O processo de conversão de energia luminosa em energia elétrica é feito por células fotoelétricas ou fotovoltaicas. A energia solar pode ser transformada diretamente em calor, ou em várias outras formas. Os ventos (energia eólica), embora possa não parecer à primeira vista, é subproduto da energia solar. Mesmo os combustíveis fósseis, como petróleo, foram produzidos com energia solar, via fotossíntese, no passado remoto da Terra.

A luz ultravioleta emitida pelo Sol tem propriedades antissépticas e é utilizada em atividades de saneamento. Ela também desempenha papel importante na síntese de vitamina D no corpo humano, ainda que, em excesso, possa provocar queimaduras sérias e produzir danos como câncer de pele. A exposição direta do olho à luz solar provoca queimadura irreversível na retina, levando à cegueira. Issac Newton foi uma das vítimas de lesão da retina provocada por observação direta do Sol. Não ficou cego, mas teve um longo e complicado período de recuperação desse acidente. A luz ultravioleta é fortemente atenuada pela camada de ozônio presente na atmosfera da Terra. A disponibilidade desse gás, tóxico para os humanos, varia com a latitude e influencia adaptações biológicas em seres vivos, incluindo, surpreendentemente, na variação da cor da pele humana.

1. $1\text{G (giga)} = 10^9$.



1- (esquerda) Esquema das manchas solares de 26/06/1613, feito por Galileu Galilei (imagem de domínio público). (direita) Imagem de uma mancha solar de 02/07/2010, obtida com o Novo Telescópio do Observatório Solar Big Bear (Califórnia, EUA), operado pelo Instituto de Tecnologia de Nova Jersey (EUA).

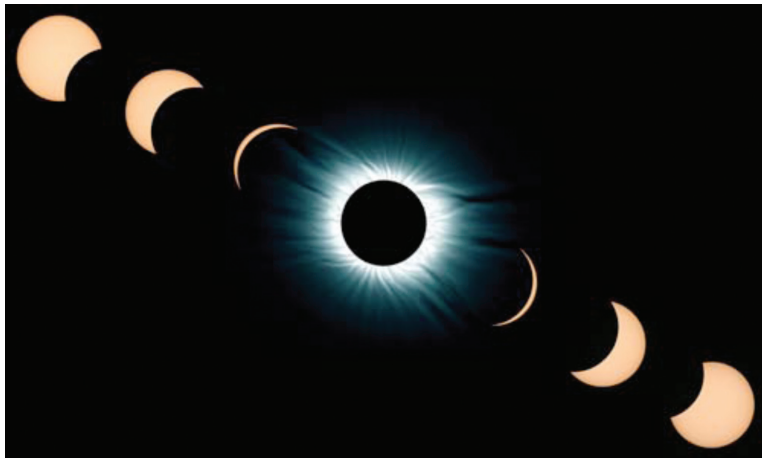


2- Stonehenge (do inglês arcaico “stan” = pedra, e “heng” = eixo). Este monumento megalítico da Idade do Bronze (de 3300 a 1100 a.C.), localizado na planície de Salisbury, condado de Wiltshire, sul da Inglaterra, pode ter sido um observatório solar (University of Exeter, <http://www.exeter.ac.uk/>).

6.1 O ESTUDO DO SOL ATRAVÉS DA HISTÓRIA

Da idade da pedra à era espacial o Sol tem sido observado com entusiasmo. No passado distante foram construídos observatórios como o Stonehenge, no que é hoje a Inglaterra, para registrar o caminho aparente percorrido pelo Sol no céu. Assim foram obtidas informações que revelam dados importantes como as estações do ano, dado fundamental para a construção do calendário, conquista indispensável para a fundação da agricultura, há aproximadamente 12 mil anos.

Pode-se considerar o eclipse total do Sol como um dos mais impressionantes fenômenos astronômicos, capaz de ser observado com certa regularidade a olho nu. O registro mais antigo de um eclipse solar foi gravado em uma argila e descoberto na antiga cidade de Ugarit, atual território da Síria, com duas datas plausíveis: 3 maio de 1375 a.C. ou 5 de março de 1223 a.C.. Por volta do século 18 a.C., os babilônios mantiveram um registro sistemático de eclipses solares, e podem até ter sido capazes de prevê-los com precisão.



3- Sequência do eclipse do Sol (créditos: Greenville County School).

4- Registro de um eclipse em argila (Nature vol. 338, págs 238 – 240, 16/03/1989; doi:10.1038/338238a0).



5- Ilustração da Pequena Era Glacial [Pieter Bruegel the Elder (1525 – 1569)].

No século 3 a.C. a distância da Terra ao Sol foi calculada pela primeira vez pelo astrônomo grego Aristarco de Samos, que já admitia o modelo heliocêntrico. Quando, no século 17, Galileu Galilei apontou um telescópio astronômico para o céu também pela primeira vez, abriu uma nova era para o conhecimento desse astro. As observações da superfície solar com telescópio começaram por volta de 1610. A partir dessa época, as manchas solares passaram a ser sistematicamente observadas. Johann Fabricius (1587-1616) e Christoph Scheiner (1517-1650), astrônomos alemães, e Thomas Harriot (1560-1621), astrônomo inglês, foram alguns dos observadores desse fenômeno que se seguiram a Galileu.

Entre 1645 e 1715 o número de manchas solares teve uma redução significativa. Durante esses 70 anos, não muito mais que 15 manchas solares foram observadas. Curiosamente, nesse intervalo de tempo, as temperaturas, registradas na Europa, foram mais baixas que o normal. Isso sugeriu que as variações ocorridas no Sol influenciaram diretamente o clima da Terra. Esse período acabou conhecido como “a pequena era glacial” e a escassez de manchas solares como “mínimo de

Maunder”, em referência ao astrônomo norte-americano Edward W. Maunder (1851-1928) que investigou esses fenômenos.

A massa do Sol e a distância que o separa da Terra só foram determinadas com precisão razoável no século 18. A primeira estimativa quantitativa da massa do Sol é atribuída a Isaac Newton. Ele apresentou o cálculo no seu famoso *Principia Mathematica*, fazendo uso da gravitação universal, formulada por ele mesmo em 1686/7.

Para investigação astronômica, num desdobramento do trabalho de Galileu, novos maiores telescópios foram construídos e instalados em observatórios, em diferentes países. Alguns deles dedicados especificamente à observação solar. Esses instrumentos permitiram conhecer fenômenos e processos dinâmicos. E cada uma dessas descobertas trouxe junto um conjunto igualmente inédito de questionamentos. O que provoca as misteriosas manchas solares? Porque o número de manchas varia ao longo de um período com certa regularidade? O que explica as violentas explosões associadas às manchas observadas no Sol? Como, mais especificamente, esse fenômeno afeta a Terra?

Com a chegada da era espacial abriram-se novas janelas para a investigação solar a partir do espaço. Sem a limitação observacional imposta pela atmosfera terrestre, sofisticados observatórios espaciais começaram a responder boa parte das perguntas sobre o complexo comportamento do Sol.

6.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Como outras estrelas, o Sol é uma esfera de gás ionizado (plasma) brilhante, sustentada por sua própria gravidade e pela energia de reações nucleares que ocorrem no seu núcleo. O Sol tem a idade do Sistema Solar (4,6 bilhões de anos) e é um astro de meia idade. À medida que envelhece, vai se expandindo, com consequências dramáticas para a Terra em um futuro distante.

O Sol brilha intensamente, observado da Terra, pela proximidade entre esses dois corpos. Se estivesse à mesma distância da estrela alfa do Cão Maior, Sirius, por exemplo, o Sol brilharia 22 vezes menos. Mas o Sol está a oito minutos-luz da Terra, enquanto Sirius, a estrela mais brilhante do céu, fica a aproximadamente 8,7 anos-luz. Acrux, alfa do Cruzeiro, observável a olho nu talvez na

Raio	$6,96 \times 10^8 \text{ m}$	$\sim 109 R_{\oplus}$
Massa	$1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$	$\sim 330.000 M_{\oplus}$
Densidade	1.410 kg/m^3	
Luminosidade	$3,8 \times 10^{33} \text{ erg/s}^{-1}$	
Temperatura superficial	5.780 K	
Período de rotação	25 dias (no equador)	34 dias (nos polos)

Tabela 1- Parâmetros físicos mais importantes do Sol. Na terceira coluna são apresentados os valores comparativamente aos terrestres. $R_{\oplus}$ e $M_{\oplus}$ são, respectivamente, raio e massa da Terra.

constelação mais conhecida do hemisfério sul, seria aproximadamente 5.500 vezes mais brilhante, se estivesse à mesma distância do Sol. Comparado a outras estrelas, em termos de massa, raio, luminosidade e composição química, o Sol ocupa uma faixa média de valores. Aqui, certamente faz sentido uma consideração. Uma estrela pode ser muito luminosa, mas aparecer com pouco brilho no céu da Terra, por sua enorme distância. Ou não ser intrinsecamente tão luminosa, mas parecer brilhante no céu, como ocorre com o Sol, devido à comparativa pouca distância a que a Terra se encontra dele.

A tabela 1 apresenta algumas das propriedades do Sol.

6.3 A ESTRUTURA DO SOL

Internamente o Sol é composto basicamente de três camadas sem nítidas fronteiras entre elas. Um núcleo central com alta densidade e temperatura, onde ocorrem as reações de transformação de hidrogênio em hélio. A cada segundo, 600 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidas em 596 milhões de toneladas de hélio e quatro milhões de toneladas são eliminadas sob a forma de energia.

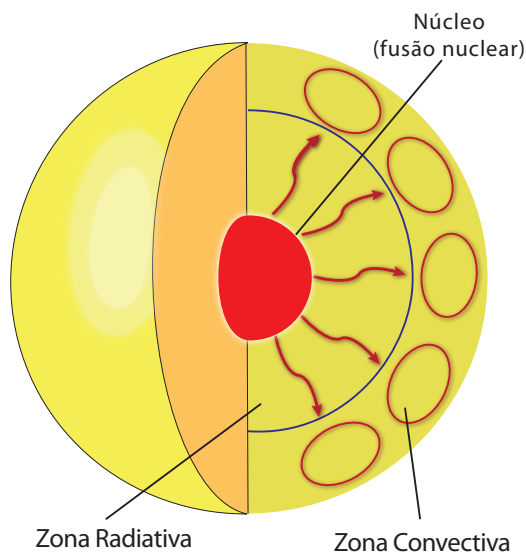
Utilizando a equação de Einstein ($E = m.c^2$), pode-se verificar que 1 kg de matéria fornece cerca de 9×10^{23} ergs de energia. A luminosidade do Sol (potência de energia emitida) medida na Terra é cerca de $3,8 \times 10^{33}$ ergs/s ($3,8 \times 10^{26}$ Watts). Para saber a quantidade de matéria que o Sol converte em energia a cada segundo dividimos este por aquele:

$$E = \frac{3,8 \times 10^{33} \text{ erg/s}}{9 \times 10^{23} \text{ erg}} = 4,2 \times 10^9 \text{ kg/s} \quad (1)$$

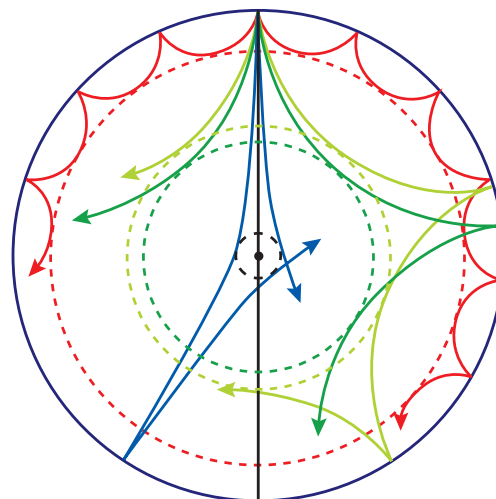
ou cerca de quatro milhões de toneladas.

Outra estimativa simples que se pode fazer é o tempo de vida que ainda resta ao Sol se ele continuar produzindo energia nessa taxa. A massa solar pode ser estimada pela 3ª Lei de Kepler modificada por Newton:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G (M + m)}{4\pi^2} \quad (2)$$



6- Representação do interior solar.



7- Ilustração da propagação de ondas no interior solar.

sendo: a - distância média da Terra ao Sol, P - período de translação, G - constante universal da gravitação, M e m - massas do Sol e da Terra, respectivamente. Como a massa da Terra é muito menor que a do Sol, podemos considerar no numerador apenas a massa do Sol. Com isto, chega-se ao valor da massa solar (tabela 1). Convertida em energia, a massa solar equivale a $1,8 \times 10^{54}$ ergs. Admitindo que apenas 0,7 % dessa massa pode ser convertida em energia, teremos $1,52 \times 10^{52}$ ergs. Assim, dividindo esta energia pela luminosidade solar obteremos o tempo de vida do Sol:

$$t = \frac{1,52 \times 10^{52} \text{ erg/s}}{3,8 \times 10^{33} \text{ erg/s}} = 3,5 \times 10^{19} \text{ s} \approx 10^{11} \text{ anos} = 10 \text{ bilhões de anos} \quad (3)$$

Como o Sol já viveu 4,6 bilhões de anos resta ainda 5,4 bilhões de anos de vida. Um cálculo mais preciso leva ao valor de 5 bilhões de anos.

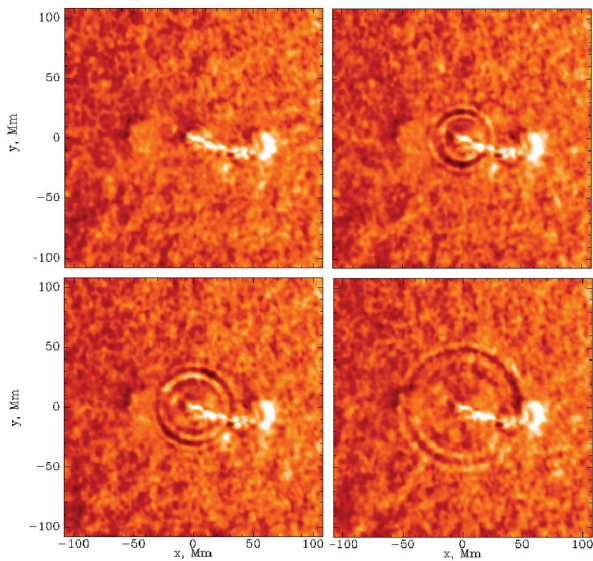
Envolvendo o núcleo solar há uma camada denominada zona radiativa. Nela a energia é transportada pelos íons do plasma, através de absorção e reemissão de fótons. Acima dela está um envoltório convectivo onde a energia é transportada por células de convecção. Na interface entre a zona radiativa e a convectiva há uma camada de transição com um complexo campo magnético.

A energia gerada no núcleo é transportada gradualmente até a superfície solar (fotosfera), de onde escapa sob a forma de calor, luz e outras formas de radiação. Todo esse trajeto leva em torno de 1,5 milhão de anos.

O estudo da estrutura interna do Sol é possível por modelagem matemática. A hipótese básica aqui é admitir que o Sol está em equilíbrio hidrostático, ou seja, não há contração nem expansão. Em outras palavras, a pressão e a temperatura no núcleo são altas o suficiente para contrabalançar a compressão gravitacional, ou o peso das camadas externas. Portanto, a força interna que atua na expansão do Sol é contrabalançada pela força gravitacional que atua na contração.

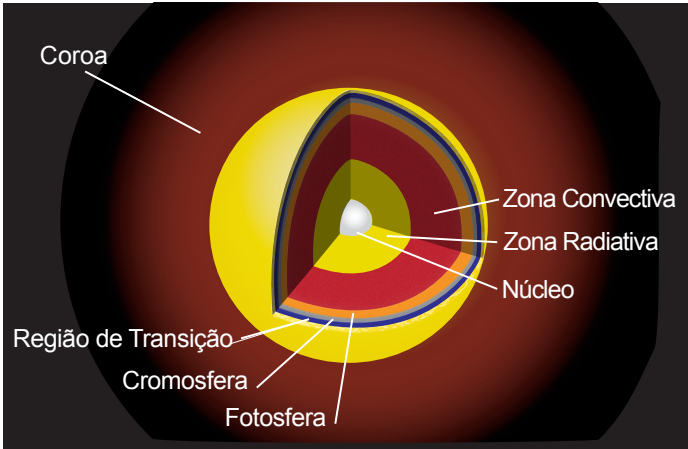
Elaborar um modelo solar significa expressar pressão, temperatura e composição química em função da massa ou raio solar. Dessa forma, chegamos às seguintes dimensões: o núcleo tem raio equivalente a 0,20 do raio solar, a zona radiativa tem 0,50 e a convectiva 0,30 do raio solar.

Pode-se investigar o interior do Sol da mesma maneira forma como se procede na Terra, isto é, pela propagação de ondas no seu interior, como ocorrem com os sismos na Terra. No caso do Sol, essa abordagem é denominada de heliosismologia, atualmente o melhor método para comprovar



8- Sismo observado em julho de 1996 provocado por uma explosão solar (bolha branca com cauda à esquerda). Acompanhamos da esquerda para a direita a evolução das ondas sísmicas (SOHO/EIT. SOHO é um projeto de cooperação internacional entre ESA e NASA).

9- Esquema da estrutura do Sol (fora de escala).



REGIÃO	ESPESSURA (km)	DENSIDADE (g/cm ⁻³)	TEMPERATURA (K)
Interior			
Núcleo	~ 2× 10 ⁵	~ 150	150.000.000
Zona Radiativa	~ 3× 10 ⁵	cai de 20 a 0,2	7.000.000 - 2.000.000
Zona Convectiva	~ 2× 10 ⁵	< 0,2	2.000.000 – 6.400
Superfície			
Fotosfera	~ 500	~ 4.0 × 10 ⁻⁷	6.400 – 4.400
Atmosfera			
Cromosfera	~ 2,5× 10 ³	~ 2.0 × 10 ⁻⁷	4.400 – 20.000
Região de transição	~ 8,5× 10 ³	1.0 × 10 ⁻¹⁶	20.000 - 1.000.000
Coroa	tamanho indefinido, atinge vários raios solares	< 2.0 × 10 ⁻¹⁷	> 1.000.000

Tabela 2- Dimensões de cada componente do Sol.

os modelos teóricos. Os sismos solares de maior frequência ocorrem próximos à superfície e os de menor frequência nas regiões mais internas. Como a propagação das ondas depende das condições físicas locais, as observações permitem construir modelos teóricos do interior solar.

A primeira detecção de um sismo solar ocorreu em 1996 com a análise de dados de um instrumento do satélite SOHO (Solar and Heliospheric Observatory). O SOHO vem operando desde 1995 em órbita de 1,5 milhão de quilômetros do Sol.

As partes mais externas do Sol, acessíveis à observação direta, apresentam grande variação das condições físicas com a profundidade, como temperatura, pressão e composição química. Elas podem ser divididas em três regiões: fotosfera (superfície), cromosfera e coroa (atmosfera).

A tabela 2 resume as dimensões de cada componente do Sol.

As estrelas emitem energia em espectro eletromagnético contínuo (todas as frequências) segundo a Lei de Planck, que expressa a radiação de corpo negro. A radiação proveniente do interior estelar sofre absorção ao atravessar regiões mais frias na fotosfera. A absorção ocorre seletivamente em função dos átomos que compõem a fotosfera, formando as linhas de absorção específicas desses elementos químicos. Conhecendo-se o espectro estelar temos informações a respeito da temperatura, da composição química e das condições físicas, como gradientes² de temperatura e pressão da região onde as linhas são formadas.

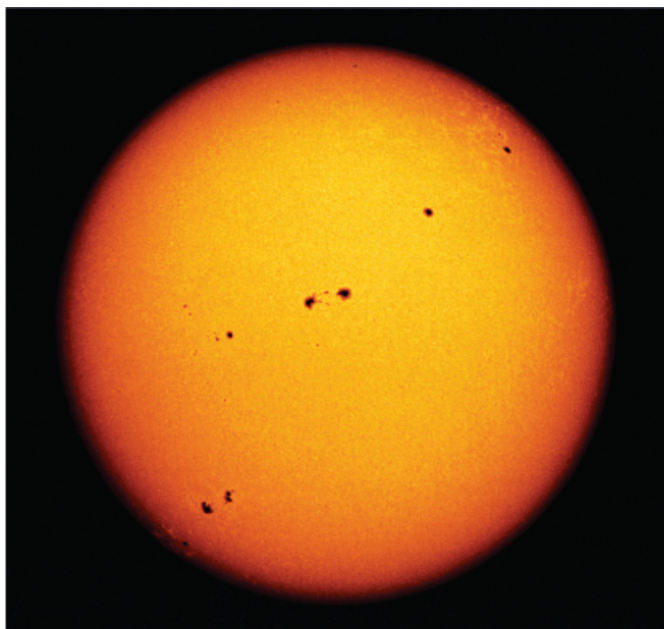
As próximas seções são dedicadas à descrição das regiões mais externas do Sol, onde se apresentam os fenômenos diretamente observáveis.

6.3.1 FOTOSFERA

As camadas mais internas do Sol apresentam um alto grau de opacidade que impede a visão direta de regiões mais profundas. A fotosfera (esfera de luz) é uma camada bastante estreita, com cerca de 500 km de espessura. A maior parte da luz solar emitida vem da região mais profunda, os primeiros 150 km. A temperatura média da fotosfera é de 5.800 K, mas ela varia de 6.400 K na base a 4.400 K no topo. A densidade diminui consideravelmente quando comparada às camadas mais internas. O valor médio é 5×10^{15} partículas/cm³). Uma densidade menor favorece a diminuição da opacidade, permitindo que a radiação se propague livremente.

Na região espectral da luz visível, é possível observar apenas o disco solar de contorno bem definido, a fotosfera, uma fina camada com espessura menor que 0,1% do raio do Sol. Um corpo gasoso, o Sol não exibe uma superfície sólida ou líquida como a Terra. A fotosfera é considerada a superfície solar, e apesar de relativamente fina, é opaca e isso impede a visão de camadas mais internas.

2. Gradiente: alteração no valor de uma quantidade (como luz, temperatura, pressão etc.) por unidade de medida de distância em uma direção especificada.



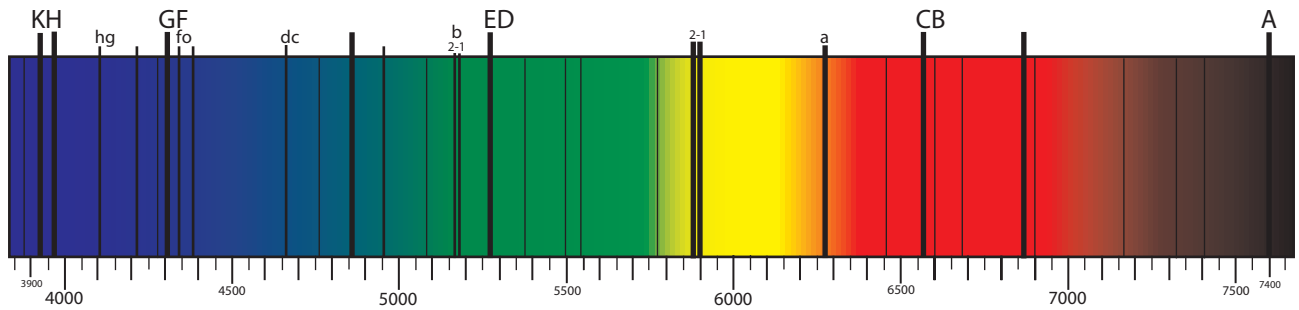
10- Presença de manchas no disco solar registrado na luz visível (NASA).

• Espectro de Absorção

Embora linhas de absorção no espectro solar sejam conhecidas desde 1802, o estudo sistemático (medidas e catalogação) delas foi feito pelo óptico alemão Joseph Von Fraunhofer (1787-1826) nos anos seguintes (figura 11). Para identificá-las, ele utilizou a nomenclatura de letras maiúsculas, para denotar as linhas mais fortes, e minúsculas para as mais fracas. As mais referidas, atualmente, são as linhas D do dupletto de sódio, as linhas H e K do Ca II (uma vez ionizado) e as linhas b do magnésio. Identificações mais recentes incluem as linhas do hidrogênio, da série de Balmer. Na região do ultravioleta o espectro é dominado por linhas de emissão produzidas na cromosfera e na coroa solar. Até então não se conhecia a origem química dessas linhas. As letras usadas por Fraunhofer para identificar linhas nada tinham a ver com símbolos químicos, nem com os símbolos que designam os tipos espectrais das estrelas. O uso atual de algumas designações deve-se simplesmente à conveniência.

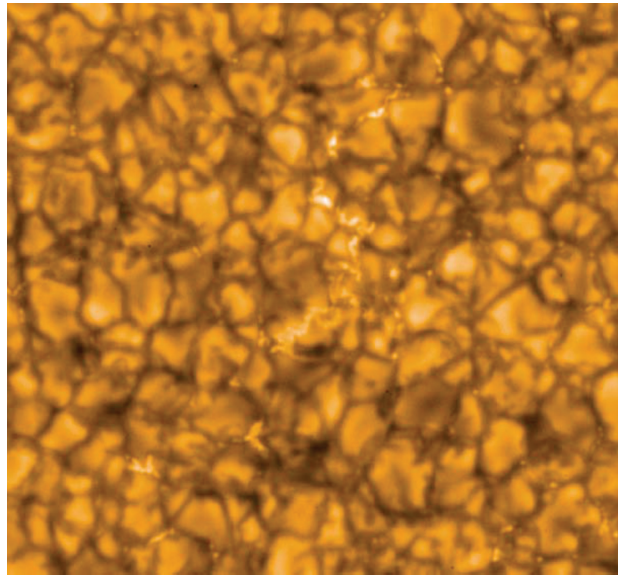
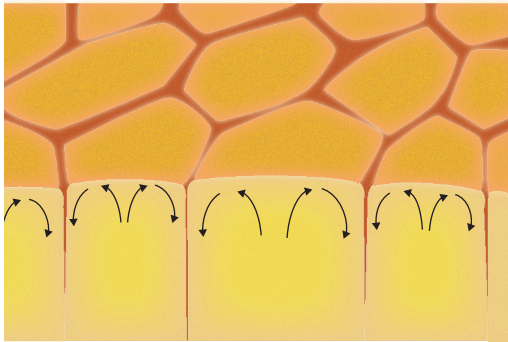
Sabe-se, agora, que cada linha de absorção é produzida pela transição de um elétron entre níveis de energia em um átomo. Cada elemento químico apresenta um padrão típico de linhas. Assim, conhecendo o padrão de linhas em laboratório podemos compará-los aos padrões observados em qualquer parte do Universo e identificar os elementos químicos responsáveis. As linhas de absorção mais fracas são produzidas nas regiões mais internas da fotosfera, enquanto que as mais fortes são geradas nas regiões mais externas, como o caso das linhas H e K do Ca II – as mais fortes, formadas principalmente na base da cromosfera. A análise das linhas espectrais permite deduzir propriedades da fotosfera, além da composição química. Em número, o elemento mais abundante é o hidrogênio (92%) seguido do hélio (6%)³, enquanto elementos mais pesados como carbono, nitrogênio, oxigênio, neônio, magnésio, silício, enxofre e ferro somam cerca de 2% da massa total. Em menor percentual ainda estão outros elementos como sódio, alumínio, fósforo, potássio e cálcio.

3. Em massa os valores são H (71%) e He (27%).



11- Linhas de Fraunhofer no espectro solar [nl:Gebruiker:MaureenV (26 Jan 2005)].

12- À esquerda representação das células convectivas. À direita, granulação solar. Os tamanhos típicos dos grânulos são comparáveis aos continentes terrestres (NASA).



• Granulação

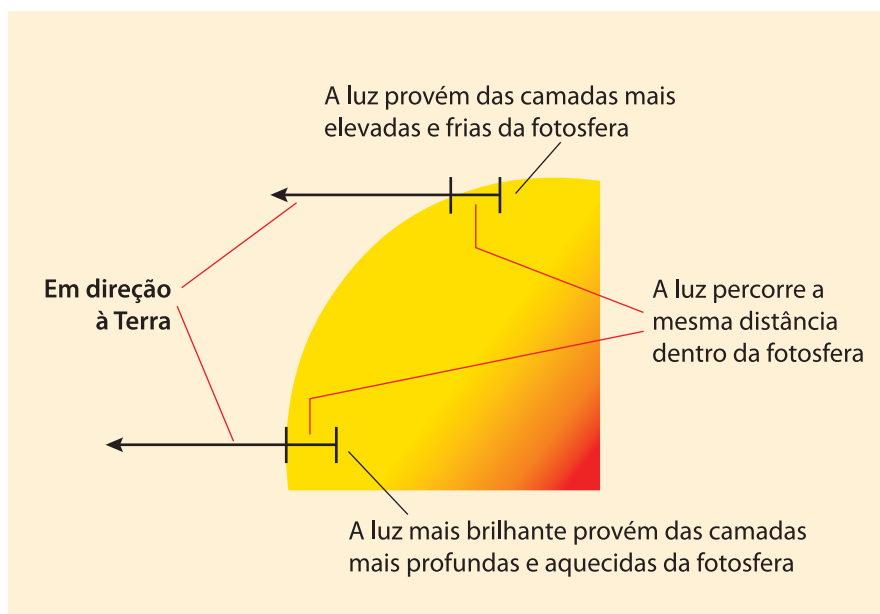
Imagens diretas da fotosfera mostram que ela não é homogênea e que seu brilho também não é uniforme. Ela apresenta uma textura granular, formada por células convectivas com cerca de 700 km de diâmetro e tempo de vida médio de alguns minutos. A granulação solar é formada no topo da zona convectiva, região em que as chamadas células de convecção crescem em tamanho e transportam, por convecção, energia que será dissipada na fotosfera. Com o esfriamento, os gases voltam a mergulhar pelas bordas escuras das células.

• Borda do Sol

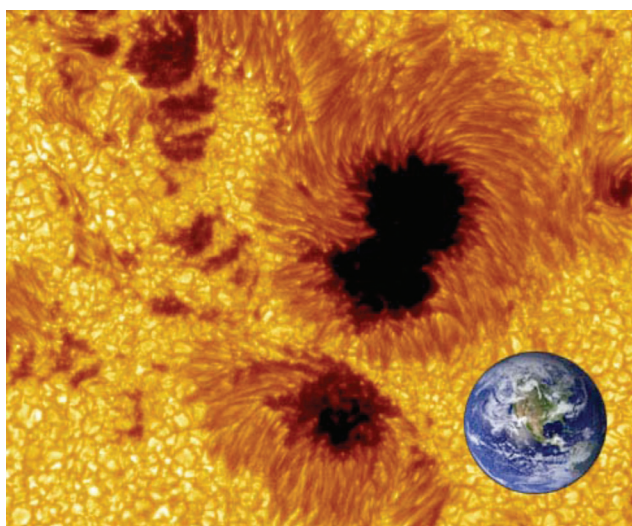
Como se vê, o brilho superficial do disco solar não é uniforme. Nas bordas solares há uma diminuição de brilho (figuras 10 e 13) definida como obscurecimento de limbo, provocado pela variação de temperatura na fotosfera. Quanto mais profunda estiver a camada vista, mais quente ela será. Na direção do centro do disco solar o brilho provém de todas as camadas da fotosfera, mas nos bordos ele se origina de camadas mais externas e mais frias e menos brilhantes (figura 13).

• Manchas Solares

As manchas solares são as formações mais marcantes da fotosfera (figura 14). Elas variam em tamanho, abundância e posição ao longo do tempo. Essas manchas estão associadas a poderosos



13- Geometria que implica no obscurecimento do limbo. A radiação do limbo é proveniente de camadas mais externas, mais frias, portanto, menos brilhantes.



14- Mancha solar em detalhes e comparação com o diâmetro da Terra [trabalho de arte: Randy Russell. Imagens: Royal Swedish Academy of Sciences (mancha) e NASA (Terra)].

campos magnéticos e têm, em média, 10 mil quilômetros de diâmetro, e podem superar o diâmetro da Terra. A parte central da mancha (umbra) é mais escura por ser mais fria, com temperatura aproximada de 4.500 K. A penumbra, estrutura que circunda a umbra, é mais clara, com temperatura média de 5.500 K.

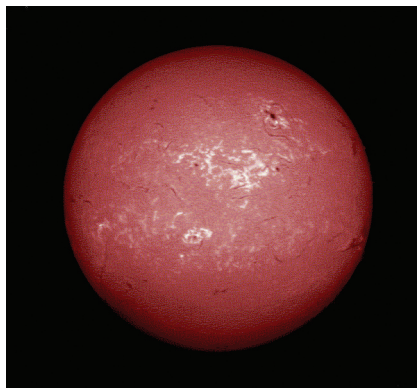
A longevidade da mancha é de alguns meses. Quando surge ela é pequena, mas aos poucos ela aumenta, até se fragmentar e desaparecer. As manchas aparecem em grupos, segundo a bipolaridade do campo magnético. Uma mancha associada à polaridade norte vem sempre acompanhada por outra associada à polaridade sul do campo magnético. Podem apresentar-se tanto dispersas como centradas.

Os campos magnéticos associados às manchas são intensos, cerca de 50 mil vezes mais poderosos que o campo magnético terrestre medido nos polos. Esse campo inibe o transporte de energia das camadas mais profundas do Sol. Observações do deslocamento das manchas, no sentido de leste para oeste, permitem determinar o período de rotação do Sol em função da latitude. Em valores aproximados, o período de rotação solar varia entre 34 dias nos polos (rotação mais lenta) e 25 dias no equador (mais rápida). A dependência da rotação com a latitude é chamada rotação diferencial.



15- As quatro linhas de emissão da série de Balmer do Hidrogênio. A linha vermelha à direita é $H\alpha$.

16- O Sol observado através de um telescópio utilizando filtro H_α (SOHO/NASA/ESA0).



6.3.2 CROMOSFERA

Essa é a camada da atmosfera solar logo acima da fotosfera. A densidade na cromosfera é bem menor que a da fotosfera e sua espessura é de aproximadamente 2.500 km. A densidade diminui de 10^{12} partículas/cm³ na base até 10^9 partículas/cm³ na parte mais externa. Em massa essas densidades são aquelas da tabela 2. Nessa camada, a temperatura aumenta da base para o topo, mas tem média de 10.000 K. Acredita-se que esse aquecimento se origine na turbulência do envelope convectivo, onde as ondas seriam excitadas e amplificadas em choques, produzidos pela propagação nas regiões menos densas. O aquecimento seria devido à dissipação desses choques na cromosfera.

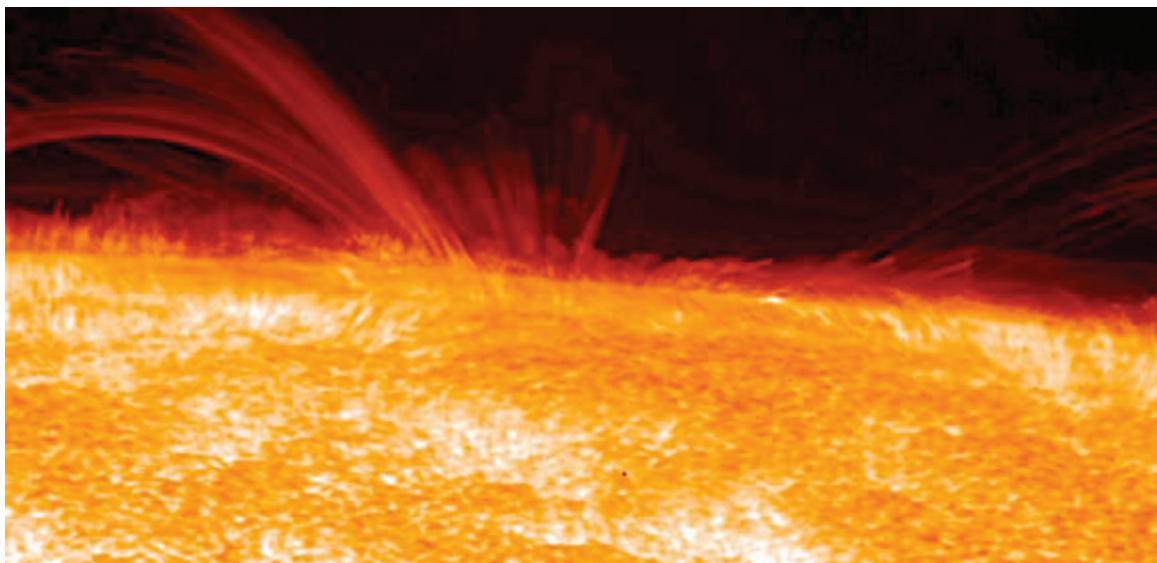
• Espectro

O nome cromosfera (literalmente, significa esfera colorida) é baseado em sua cor avermelhada, devido a emissão da linha de hidrogênio da série de Balmer (referência a Johann Jakob Balmer, físico-matemático suíço, 1825-1898) ($H\alpha$) em 656,3 nm (figura 15) e visível durante eclipses solares, quando o brilho intenso da fotosfera é obscurecido. A figura 16 mostra a imagem do Sol observado em $H\alpha$.

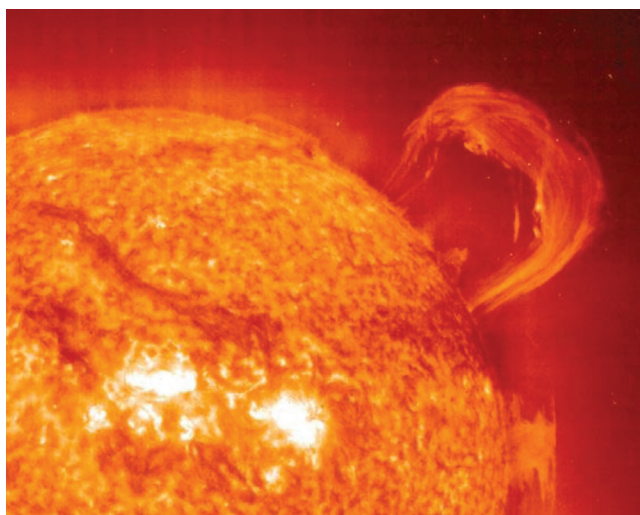
A principal linha de emissão no espectro cromosférico é a linha do hélio, que requer altas temperaturas para ser excitado. O hélio foi detectado no Sol em 1868 pelo astrônomo inglês Joseph Lockyer (1836-1920) antes de ser descoberto na Terra, daí a origem do seu nome – em grego *helios* significa Sol. Quando um átomo absorve fótons de baixa energia, ou colide com partícula de baixa energia cinética (de movimento), adquire energia. Na realidade, essa energia é absorvida por um de seus elétrons que passa a circular o núcleo em estado mais energético. A tendência é que esse elétron volte ao estado de menor energia, liberando o excesso de energia na forma de um fóton. Essas transições são chamadas transições atômicas de baixo potencial de excitação. Na base da cromosfera elas ocorrem em metais neutros (não ionizados), mas em altitudes maiores se apresentam nas linhas espectrais do cálcio e do ferro ionizado.

• Atividade cromosférica

As regiões esbranquiçadas visíveis na figura 16 são chamadas praias. Elas apresentam maior atividade e são mais quentes, por isso brilham mais. Nessa mesma imagem pode-se observar regiões



17- Espículos solares: jatos estreitos de gases aparecem escuros por serem mais frios (NASA).

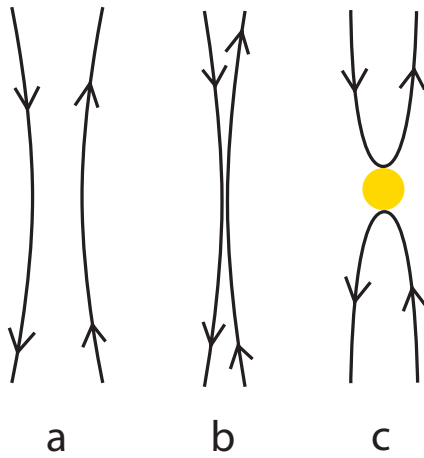


18- Protuberância solar. Imagem de setembro de 1999 feita pelo satélite SOHO (NASA).

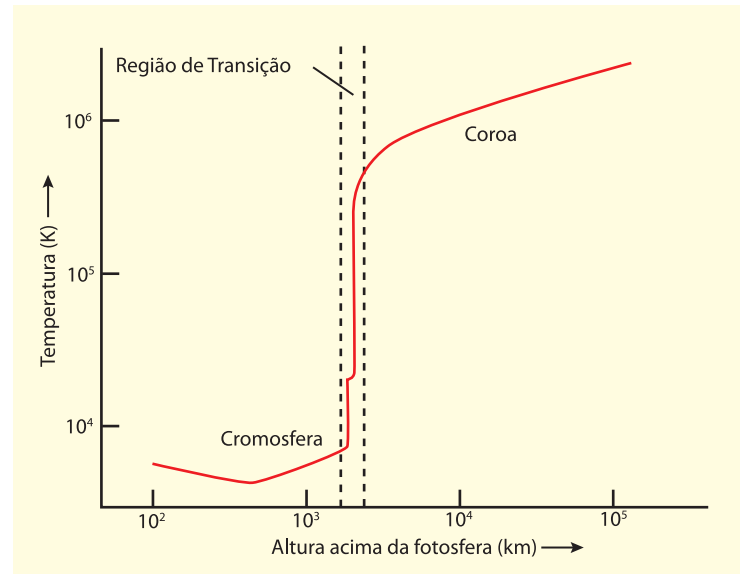
escuras, com característica de segmento, chamados de filamentos. Eles são nuvens de material denso e frios suspenso acima da superfície solar por arcos de campo magnético. A cromosfera exibe um padrão de células semelhante ao da fotosfera. As células cromosféricas têm dimensão e tempo de vida bem maior em relação às suas contrapartidas da fotosfera, cerca de 30.000 km e 25 horas de vida, respectivamente. Por isso, são chamadas supergranulações.

Contornando as supergranulações, há jatos tênues de gás brilhante com extensões de 500 a 1.500 km, elevando-se até 10.000 km acima da cromosfera. Esses fenômenos de ejeção de gases recebem o nome de espículos e emitem principalmente radiação $H\alpha$. Eles são vistos com facilidade no limbo do Sol. Apesar de ocuparem apenas uma fração da superfície solar e durarem pouco menos que 15 minutos, os espículos podem representar um papel importante no equilíbrio de massa da cromosfera, da coroa e do vento solar.

As estruturas mais típicas da cromosfera são as protuberâncias, arcos magnéticos vistos no limbo. Por elas circulam o plasma cromosférico (figura 18). Com configuração complexa as bases das protuberâncias estão apoiadas sobre regiões com polaridades magnéticas opostas, formando arcos magnéticos por onde circula a matéria cromosférica. Suas dimensões podem ser enormes e a duração prolongar-se por horas. Essas estruturas permeiam a coroa solar, que é muito mais quente.



19- Esquema de reconexão magnética. Linhas magnéticas de polaridades opostas (a), sob circunstâncias favoráveis (b), podem se recombinar em ciclos opostos (c) liberando instantaneamente energia aprisionada no tubo magnético.



20- Variação de temperatura na região de transição entre a cromosfera e a coroa solar.

Quando observadas na linha $H\alpha$ do hidrogênio e sobre o disco solar (vista do topo da arcada), as protuberâncias aparecem como filamentos escuros. O tempo de vida das protuberâncias pode variar de dias a semanas.

As linhas de campo magnético em forma de arcos que ligam manchas solares de polaridades opostas formam estruturas denominadas tubos magnéticos. Esses tubos podem movimentar-se de modo a acabarem retorcidos. Isso implica em armazenamento crescente de energia no interior do tubo à medida que a torção das linhas de campo aumenta. Quando as linhas se cruzam ocorre seu rompimento e posterior reconexão com a liberação violenta de toda energia armazenada, provocando erupções de brilho (figura 19). Essas erupções podem liberar mais energia que as grandes protuberâncias e são denominadas “flares” (clarões). Observações em raios X e ultravioleta mostram que as áreas mais compactas, localizadas nas regiões centrais dos flares, podem atingir temperaturas da ordem de 100 milhões K.

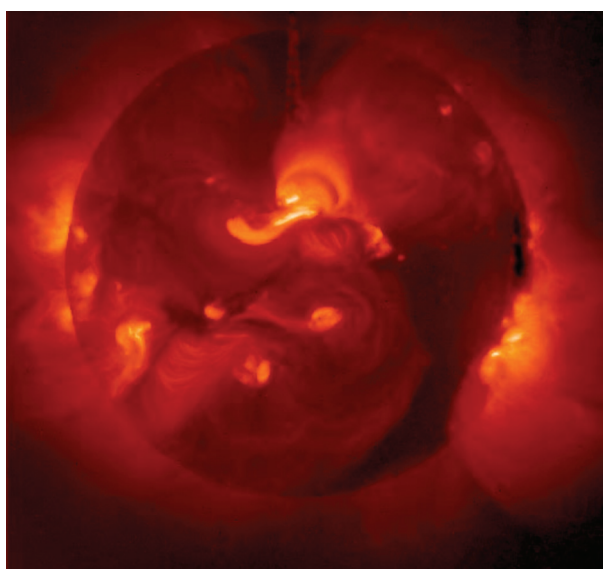
6.3.3 REGIÃO DE TRANSIÇÃO

Algumas linhas da região espectral do ultravioleta são formadas nas temperaturas cromosféricas mais altas, o que demonstra a existência de uma região de transição entre a cromosfera e a coroa solar. Nessa região, a temperatura cresce rapidamente. Em uma faixa da cromosfera de apenas algumas centenas de quilômetros a temperatura sobe de 10.000 K a 50.000 K, chegando a 1 milhão K na coroa. Nas altas temperaturas, nas regiões mais externas da atmosfera solar, os átomos e íons são excitados por colisão⁴, produzindo linhas de emissão quando voltam para seus estados fundamentais. A mais intensa das linhas do ultravioleta é a de Lyman- α , produzida pelo hidrogênio no comprimento de onda 121,5668 nm (1.215,668Å).

4. Durante as colisões parte da energia cinética das partículas colidentes é transformada em energia de excitação, isto é, elétrons dos átomos e íons absorvem energia e saltam para níveis mais elevados de energia. Ao retornarem aos estados mais baixos de energia, os elétrons liberam energia excedente na forma de radiação eletromagnética, em comprimentos de onda específicos.



21- Fotografia da coroa solar na luz visível feita com coronógrafo (telescópio específico para observar a coroa). É a luz fotosférica espalhada apenas pelos elétrons (<http://www.mreclipse.com/SEphoto/TSE1991/TSE1991galleryB.html>).

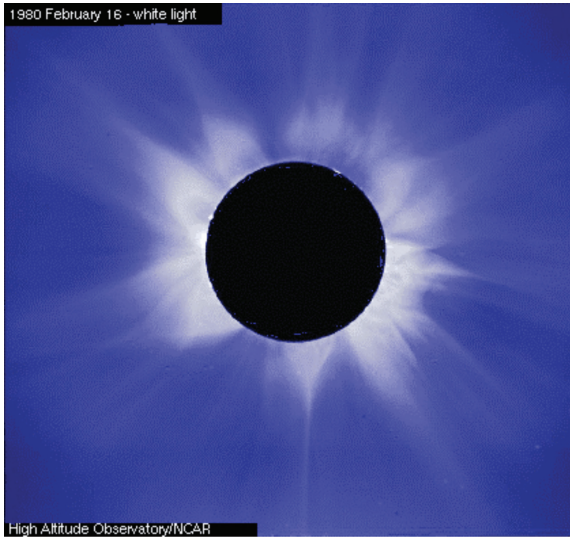


22- Coroa solar vista em raio-X (NASA, http://sunearthday.nasa.gov/2008/multimedia/gal_002.php).

6.3.4 COROA SOLAR

Durante um eclipse total, a região coronal na luz branca aparece como um halo que se estende muito além do limbo solar, correspondendo à região mais externa e mais extensa da atmosfera solar (figura 21).

O gás coronal é muito tênue e quente atingindo temperaturas da ordem de 1 a 2 milhões K. Ainda faltam detalhes para entendermos completamente esse repentino aumento da temperatura, mas já se sabe que o campo magnético exerce um papel fundamental neste processo. A essa temperatura o hidrogênio está ionizado e a coroa é um gás formado essencialmente por elétrons e prótons livres, o plasma.



23- Elmos coronais, com suas formas pontiagudas (http://umbra.nascom.nasa.gov/spartan/the_corona.html).



24- Arcos coronais formados pelo magnetismo solar (créditos: NASA).

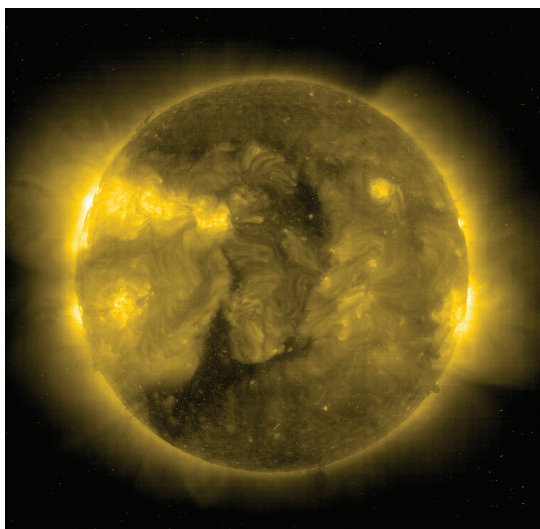
A luz coronal pode ser dividida em três tipos: luz branca, linhas de emissão e raio X. Na luz branca a coroa é formada pela luz proveniente da fotosfera. Essa luz pode ser espalhada pelos elétrons livres da coroa e formar a coroa K. Ou, pode ser espalhada por grãos de poeira zodiacal, e formar a coroa de Fraunhofer. A coroa de emissão (ou coroa E) é formada de luz emitida por átomos altamente ionizados (que perderam muitos elétrons), como o Fe X (perdeu 9 elétrons), o Ca XV (sem 14 elétrons) e o Fe XIV (com menos 13 elétrons). A luz emitida desta forma não é contínua como a luz branca, mas em comprimentos de onda específicos. Portanto, essa coroa só aparece em linhas espectrais. Átomos ainda mais ionizados (portanto bem mais quentes) emitem luz em raio X. Essa luz é que forma a coroa de raio X...

Como os elétrons interagem com o campo magnético, a configuração da coroa é a do campo magnético global. O brilho coronal varia em função da atividade solar. Em fases de máximos de manchas solares a coroa é brilhante e uniforme, enquanto que nos períodos de mínimo de manchas solares a coroa se estende mais no equador que nos polos.

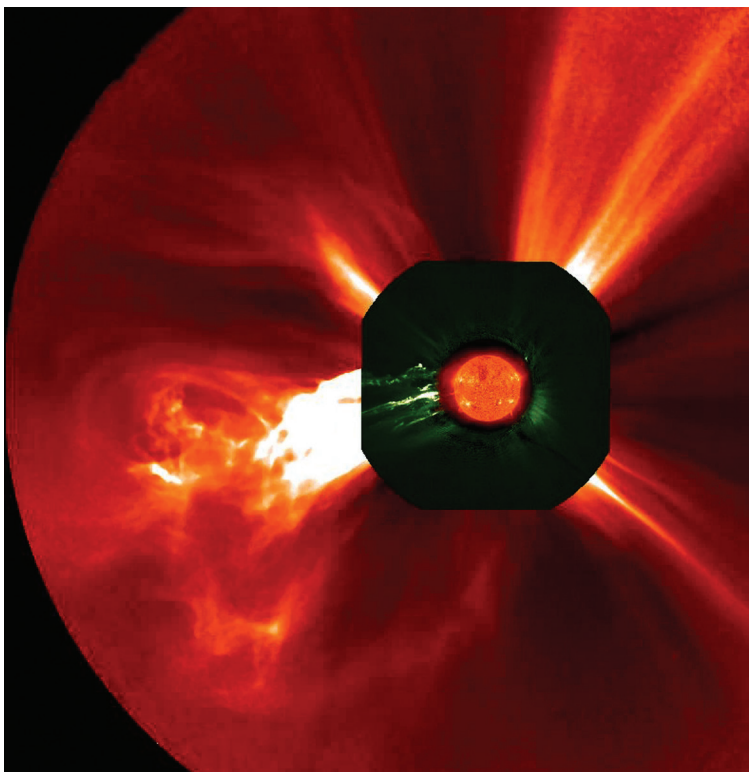
Estrutura comum entre as formadas na interação entre elétrons e o campo magnético são os elmos (*helmet streamers*). Eles são construções coronais semelhantes a chapéus cônicos que cobrem as manchas solares e regiões ativas. Usualmente encontra-se protuberâncias ou filamentos situados na base dessas estruturas. Os elmos são formados por um emaranhado de linhas de campo originários das manchas e das regiões ativas. As linhas magnéticas fechadas têm força suficiente para aprisionar o plasma solar e ajuda na suspensão do material da protuberância acima da superfície solar. Sua forma pontiaguda deve-se ao vento solar.

Plumas polares são estruturas alongadas que se projetam para fora do Sol nas regiões polares norte e sul. Frequentemente encontra-se áreas brilhantes em sua extremidade na fotosfera associadas a pequenas regiões magnéticas na superfície solar. Essas estruturas estão relacionadas a linhas abertas do campo magnético polar. Assim como os elmos, sua forma é devida à ação do vento solar.

Outra estrutura tipicamente coronal encontrada sobre as manchas solares e regiões ativas é o arco coronal. Os arcos são formados por linhas fechadas de campo magnético que conectam regiões magnéticas de polaridades opostas. São formações temporárias que podem durar vários dias, em alguns casos sobrevivem por algumas semanas. Os arcos associados aos flares solares são efêmeros. A densidade de matéria nos arcos é muito maior que a do meio no entorno.



25- Buracos coronais são regiões (escuras) com configuração aberta das linhas de campo magnético por onde elétrons e prótons podem escapar para o meio interplanetário (crédito: SOHO - EIT Consortium, ESA, NASA).

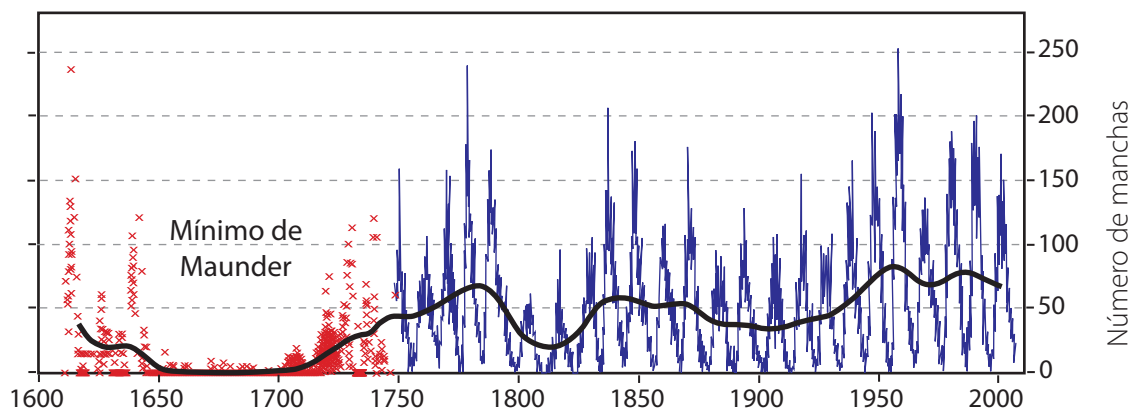


26- Ejeção de massa coronal observada em 07/06/2011. Esta imagem é resultante da sobreposição de imagens obtidas com diferentes instrumentos dos telescópios espaciais STEREO. As imagens estão na mesma escala (crédito: STEREO, NASA).

Uma imagem da coroa solar em raios X apresenta regiões escuras que contrastam com as regiões brilhantes. Essas regiões são mais frias e de menor densidade que a vizinhança e estão associadas a linhas de campo magnético abertas semelhantes às que ocorrem nas regiões polares. O vento solar de alta velocidade escapa do Sol por essas regiões escuras, por isso elas são chamadas buracos coronais.

Um dos fenômenos mais impressionantes no Sol são as gigantescas explosões de plasma na forma de bolhas, que abandonam o Sol a altas velocidades. Elas são conhecidas por ejeção de massa coronal e designadas pela abreviação CME (do inglês *Coronal Mass Ejections*). À medida que as explosões ascendem na coroa solar, elas se movem ao longo das linhas de campo magnético e aumentam de temperatura até dezenas de milhões de graus. Essas explosões liberam até 100 milhões de toneladas de plasma. As CMEs podem provocar sérios danos a satélites artificiais terrestres. Elas geralmente se manifestam de forma independente, mas podem estar associadas aos

Observação de manchas solares



27- Ciclos das manchas solares observados anualmente desde 1600. O período de 70 anos (1645 a 1715) em que não ocorreu atividade solar intensa é chamado de mínimo de Maunder (Robert A. Robde / Global Warming Art”, http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Sunspot_Numbers_png).

flares solares e protuberâncias. A ocorrência das CMEs varia com o ciclo de manchas solares. No mínimo, observa-se aproximadamente uma CME por semana. Próximo do máximo solar observa-se uma média de duas a três delas por dia.

6.4 ATIVIDADE SOLAR

A radiação e o fluxo de elétrons, prótons e íons mais densos que emanam do Sol variam de acordo com a atividade solar. Esse fenômeno contribui pouco para a variação da luminosidade solar e afeta pouco a evolução do Sol. Mas afeta significativamente o meio interplanetário.

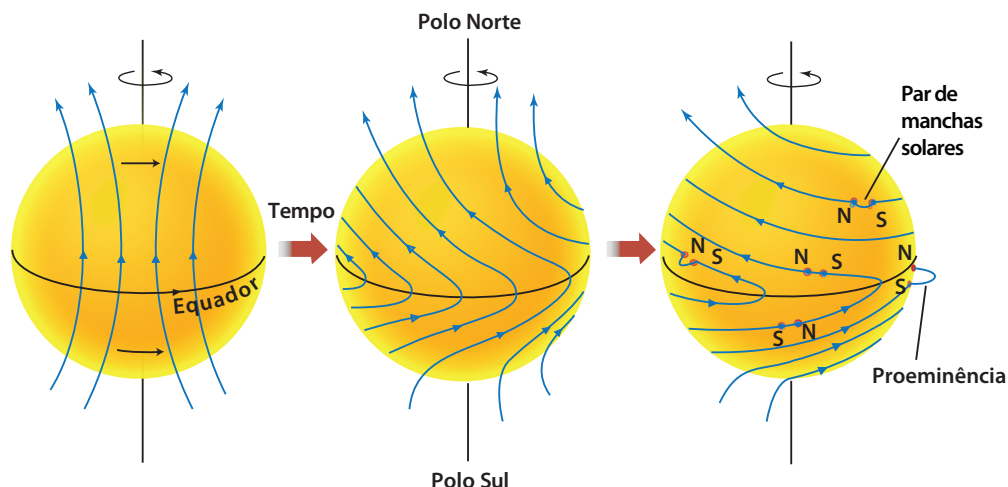
6.4.1 MANCHAS SOLARES E O CICLO DE 11 ANOS

Desde a época de Galileu são feitas contagens do número de manchas solares visíveis contribuindo para definir um fenômeno cíclico, com intervalo médio de 11 anos entre picos ou vales de manchas. Neste ciclo de 11 anos ocorre também uma variação da distribuição das manchas em relação à latitude solar. No início do ciclo, elas aparecem preferencialmente nas altas latitudes ($\pm 35^\circ$), mas no pico de intensidade encontram-se a $\pm 15^\circ$, e, no mínimo, concentram-se em torno de latitudes $\pm 8^\circ$. Entre 1645 e 1715, quando o número de manchas foi anormalmente baixo (mínimo de Maunder), definiu uma das três anomalias dos últimos mil anos. As outras ocorreram entre 1460 e 1550 (mínimo de Spörer) e 1280 e 1350 (mínimo de Wolf).

O ciclo de 11 anos é o mais evidente, mas há outros de períodos mais longos que se correlacionam às idades de gelo: as eras glaciais terrestres. É praticamente consenso entre a comunidade de astrofísicos solares que a quantidade de manchas solares está associada à atividade solar. Quanto mais manchas, mais ativo o Sol.

6.4.2 CAMPO MAGNÉTICO GERAL E O CICLO MAGNÉTICO

O campo magnético solar não está presente apenas nas manchas, mas em todo o Sol. Com configuração bipolar, o campo magnético geral apresenta polaridades opostas nos hemisférios: um he-



28- Como o Sol gira mais rapidamente no equador as linhas do campo magnético são distorcidas e acabam adquirindo direções opostas nos dois hemisférios. Nas manchas do hemisfério solar norte, o norte magnético das manchas está à direita (a linha emergente) e o sul magnético à esquerda (linha imergente). No hemisfério solar sul a situação se inverte (adaptado de Chaisson & McMillan, fig. 16.19, pág. 366).

misfério tem polaridade norte e o outro tem polaridade sul. Um fato marcante é que durante o ciclo médio de 11,2 anos de variabilidade da quantidade das manchas, essa polaridade se inverte, isto é, o hemisfério que tinha polaridade norte adquire polaridade sul, e o outro que tinha polaridade sul passa a norte. Depois de 11,2 anos, tudo se inverte novamente. Portanto, o período de variabilidade do campo magnético global solar é de 22,4 anos.

As polaridades magnéticas das manchas seguem ordem inversa nos dois hemisférios: se num hemisfério os polos norte das manchas estão a leste, no hemisfério sul esses polos estão a oeste. Depois de 11,2 anos, as polaridades dos hemisférios também se invertem e essa situação se altera. O diagrama da figura 28 ilustra como a rotação diferencial do Sol influencia a polaridade magnética geral e porque as manchas de hemisférios opostos apresentam polaridades invertidas.

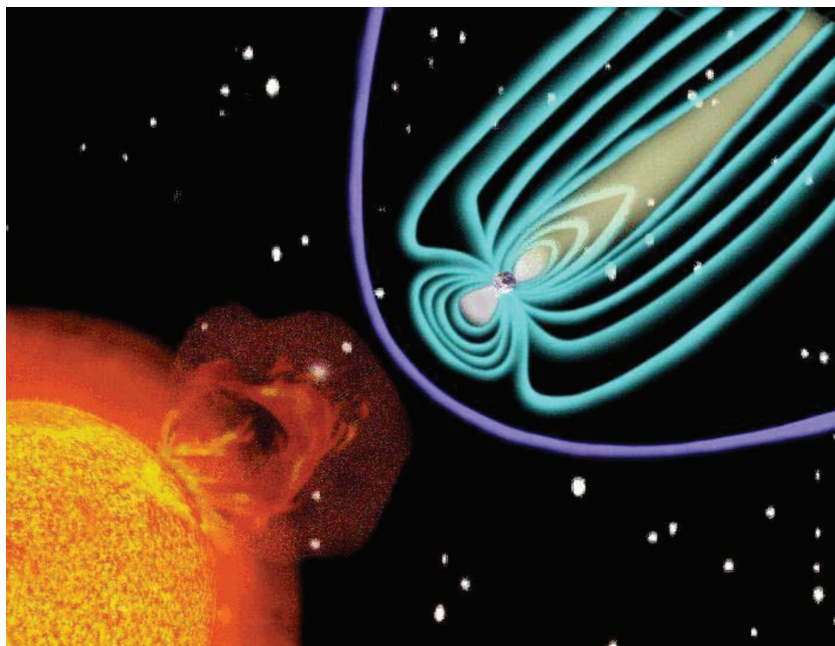
Observações recentes com o satélite solar SOHO mostram que o campo magnético geral do Sol está associado a velocidade diferencial entre as camadas convectiva e radiativa e os complexos movimentos do gás no envelope convectivo. Esse mecanismo é denominado efeito dínamo.

6.4.3 CENTROS DE ATIVIDADE

Longe de serem fenômenos isolados, as manchas estão associadas a outros fenômenos de superfície que ocasionalmente emergem com violência e expõem em direção à coroa grandes quantidades de partículas energéticas. Os locais onde ocorrem esses eventos são conhecidos por centros de atividade. Embora possam sobreviver por várias rotações solares, o tempo de vida média dos centros de atividade é de apenas algumas semanas.

As camadas fotosféricas que circundam as manchas são aquecidas por essas atividades e tornam-se mais brilhantes, formando as fáculas. As camadas cromosféricas acima das fáculas também respondem a essas atividades com regiões brilhantes denominadas praias. Elas são vistas pela emissão do hidrogênio (linha H α em 656,3 nm, no vermelho) e do cálcio ionizado (linha H em 396,9 nm e linha K em 393,3 nm, ambas no ultravioleta).

Outro fenômeno caracterizado pela atividade solar são as protuberâncias. Essas estruturas cromosféricas se estendem por centenas de milhares de quilômetros dentro da coroa. Frequentemente estão acima das zonas ativas (figura 18).



29- Representação da interação do vento solar com a magnetosfera terrestre. A linha violeta representa a zona de choque entre o vento e a magnetosfera e linhas azuis o campo magnético terrestre deformado pelo vento, formando uma cauda magnética (SOHO, NASA, ESA).

Os clarões (do inglês *flares*) são fulgurações decorrentes da liberação súbita de grandes quantidades de energia magnética no centro das regiões ativas. Observações espaciais no ultravioleta e em raios X indicam que a temperatura da matéria num clarão pode atingir 100 milhões K. A energia liberada por uma erupção típica poderia abastecer as necessidades energéticas da humanidade por milhões de anos.

Os clarões podem liberar tanta energia quanto as maiores protuberâncias, mas em questão de minutos ou, no máximo, horas. Descobertas recentes mostram que um clarão pode produzir tremores sísmicos gigantescos que se propagam pelo interior solar. Um fenômeno desses foi observado em 6 de julho de 1996: após um clarão, ondas sísmicas se propagaram pela superfície solar por mais de 100.000 km (figura 8). Os tremores solares assemelham-se aos terrestres, mas as intensidades são mais elevadas.

6.5 VENTO SOLAR

A ação gravitacional do Sol sobre o gás coronal não é suficiente para retê-lo, ocorrendo assim um constante fluxo de matéria na forma de vento liberado pelo Sol. A composição do vento solar é basicamente a de um plasma eletricamente neutro, com elétrons e prótons em iguais proporções, átomos ionizados e campos magnéticos. A condutividade térmica (habilidade de conduzir calor) do plasma é muito grande, garantindo as elevadas temperaturas mesmo a grandes distâncias. À medida que o vento se expande, sua velocidade aumenta e a densidade de partículas diminui. Nas proximidades da Terra a densidade varia de 400 mil a 80 milhões de partículas/m³ e a velocidade varia de 300 km/s (nos elmos) a 800 km/s nos buracos coronais. Embora o vento solar carregue cerca de um milhão de toneladas de matéria solar a cada segundo, menos que 0,1% da massa solar foi perdida desde o nascimento do Sol, há 4,6 bilhões de anos. Ainda não se conhece em detalhes como e onde o vento



30- Ao se aproximar do Sol um cometa pode desenvolver uma cauda ionizada (azulada) quase retilínea, direcionada para a posição contrária à do Sol (crédito: Associazione Astronomia Cortina – www.sunrise.it/associazioni/aac/comete/95ol.html).



31- Aurora Austral sobre o polo sul (crédito Keith Vanderlinde / NSF http://www.nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=114540&org=NSF).

é acelerado a essas altas velocidades. Provavelmente, o fenômeno está associado ao mecanismo de aquecimento coronal.

O vento solar emana do Sol em todas as direções. Além de afetar os planetas, cometas e o meio interplanetário como um todo, também define a heliosfera, uma imensa bolha magnética que envolve a região mais externa do Sistema Solar. Estima-se que na direção de movimento do Sol na Galáxia, a heliosfera possa atingir até 160 UA, mas ela é bem maior na direção oposta, formando uma espécie de cauda magnética, a heliocauda. No interior da heliosfera predominam o ambiente típico do Sistema Solar e o magnetismo do Sol. Mas fora dela, prevalece o ambiente interestelar e o campo magnético de estrelas vizinhas. A nuvem de Oort, um berçário de cometas de longo período, tem dimensões muito maiores que a heliosfera, alguns milhares de vezes maior. Na região de transição (heliopausa) as partículas interestelares sofrem redução de velocidade, de supersônica a subsônica.

Uma propriedade do vento solar é sua capacidade de congelar o campo magnético e arrastá-lo consigo enquanto se expande. Como o Sol gira enquanto o vento escapa, a configuração espacial do vento acaba sendo a de uma espiral de Arquimedes. O vento solar interage fortemente com os planetas com campos magnéticos como a Terra. Dois exemplos desta interação são as auroras polares e a cauda ionizada (Tipo I) dos cometas.

Nuvens magnéticas são produzidas no vento solar quando clarões (*flares*) e ejeção de massa coronal levam consigo material do Sol embebido no campo magnético. Essas nuvens magnéticas podem ser detectadas por observações de características do vento solar como velocidade do vento, densidade e intensidade e direção do campo magnético. Esses dados foram obtidos pela sonda espacial Ulysses (ESA e NASA) lançada em 6 de outubro de 1990 e que ficou operacional por

18 anos e 8 meses. Durante seu percurso passou sobre os polos norte e sul do Sol. Suas medições deram uma nova visão do vento solar.

A magnetosfera terrestre é fortemente afetada pelo vento solar. Os cinturões de Van Allen e as auroras são intensificados por ocorrência de erupções solares que aumentam com o ciclo de atividade solar. A Terra está sendo continuamente bombardeada por partículas aceleradas provenientes não só do Sol, mas também de outras fontes do meio interestelar e da Galáxia.

A sonda espacial *Advanced Composition Explorer* (ACE), da NASA, lançada em 25 de agosto de 1997, ficará em órbita em um ponto do espaço distante 1,5 milhão de quilômetros da Terra e 148,5 milhões de quilômetros do Sol. Nessa posição, conhecida como um dos pontos lagrangianos (o L1), as forças gravitacionais da Terra e do Sol se equilibram. Isso mantém o satélite em posição estável relativamente à Terra e ao Sol. Dessa posição, a ACE terá uma visão do vento solar, do campo magnético interplanetário e das partículas de alta energia aceleradas pelo Sol, na heliosfera e na Galáxia. A ACE permanecerá operacional até 2024.

CAPÍTULO 7

Estrelas

Jane Gregorio-Hetem

7.1 CONTEXTO HISTÓRICO

7.2 PROPRIEDADES

7.2.1 LUZ PROVENIENTE DOS ASTROS: RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

7.2.2 TEMPERATURA E COR DAS ESTRELAS

7.2.3 LUMINOSIDADE (L^*): O BRILHO INTRÍNSECO DA ESTRELA

7.2.4 MAGNITUDE: O BRILHO APARENTE DAS ESTRELAS

7.2.5 DISTÂNCIAS: MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO

- Paralaxe trigonométrica
- Método para determinação de distâncias além de nossa Galáxia

7.3 CLASSIFICAÇÃO - AS ESTRELAS NÃO SÃO IGUAIS

7.3.1 ESPECTROS ESTELARES

7.3.2 A ORDEM DOS TIPOS ESPECTRAIS

7.3.3 COMPARANDO AS DIVERSAS CATEGORIAS DE ESTRELAS

7.3.4 O TAMANHO DAS ESTRELAS

7.4 EVOLUÇÃO DAS ESTRELAS

7.4.1 NASCIMENTO: ONDE SÃO FORMADAS AS ESTRELAS?

7.4.2 VIDA: PRODUÇÃO DE ENERGIA E ELEMENTOS QUÍMICOS

- Origem da energia termonuclear
- Uma fase de estabilidade: a sequência principal
- Origem dos elementos químicos

7.4.3 MORTE: ESTÁGIOS FINAIS DA EXISTÊNCIA DE UMA ESTRELA

- Fim de vida de estrelas parecidas com o Sol
- Fim de vida de estrelas massivas

A física estelar é fundamental para o conhecimento do Universo. Quando observamos o céu noturno, é difícil acreditar que aqueles pequenos pontos brilhantes, as estrelas, possam ter um significado tão extraordinário nas questões fundamentais que a humanidade busca responder há milênios. Estudar as estrelas ajuda a compreender nossas origens e também nosso destino, pois estamos abrigados em um sistema planetário que pertence a uma estrela, o Sol.

Conhecer as características das estrelas e a sua evolução, permite decifrar o passado e prever o futuro do Sol. Além disso, as estrelas encontram-se em condições físicas que nenhum laboratório reproduz, como por exemplo, o ambiente que permite a síntese dos elementos químicos e a produção de energia, indispensáveis à vida na Terra.

Este capítulo está dividido em quatro seções: contexto histórico; propriedades; classificação e evolução, onde abordaremos questões básicas como: O que é uma estrela? Onde elas se encontram? Como se avaliam suas características? Elas são todas iguais? São imutáveis?

7.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Aqui discutiremos essencialmente o que é uma estrela e onde elas se encontram. Se procurarmos num dicionário o significado de estrela, a descrição básica será “imensa esfera de gás (principalmente hidrogênio) que se encontra a altas temperaturas, produzindo energia termonuclear, mantendo-se em equilíbrio (pressão de radiação sustenta o colapso gravitacional)”.

Essa definição se aplica ao Sol, uma estrela que conhecemos relativamente bem. Outra resposta, aparentemente óbvia, refere-se às diferenças entre estrelas e planetas: “estrelas são astros que geram sua própria luz, enquanto planetas apenas refletem a luz da estrela a qual pertencem”.

Mas, no passado, quando nada se sabia a respeito de reações termonucleares, ou produção de energia e luminosidade, Sol e Lua, por exemplo, eram considerados planetas (ver capítulo 2). Os antigos diferenciavam estrelas de planetas pelo movimento. Um planeta, do grego *planētē*, era um “astro errante”, que se movia na faixa zodiacal. Já as estrelas eram consideradas fixas na esfera celeste (capítulo 1).

As estrelas, nas diferentes constelações, não estão necessariamente associadas fisicamente. Exceto nos casos de sistemas múltiplos que as reúnem por efeito gravitacional. Embora pareçam próximas,



1- Aspecto do céu na região do Centauro. A Via Láctea, formada por bilhões de estrelas, nuvens interestelares (zonas escuras), como o Saco do Carvão, próximo ao Cruzeiro do Sul, que bloqueiam a luz das estrelas de fundo. São de nuvens iguais a essas que nascem as estrelas.

as estrelas se encontram a diferentes profundidades, ou distâncias, para um observador na Terra ou em qualquer parte do Universo.

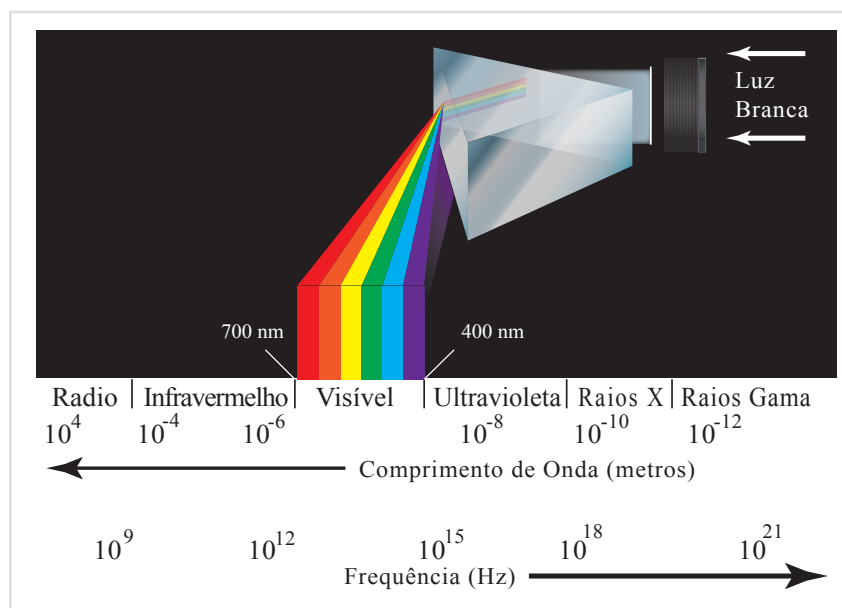
A faixa luminosa mostrada na figura 1, claramente visível num céu livre de nuvens e na ausência da luz refletida pela Lua, é formada por uma enorme quantidade de estrelas. Galileu Galilei (1562-1642) foi o primeiro a observá-la com uma luneta. Os gregos a batizaram como Caminho Leitoso, que agora se estende à nossa galáxia, a Via Láctea. Na realidade, essa faixa representa o plano de simetria da Galáxia. Veremos isto no capítulo oito.

Todas as estrelas observáveis a olho nu (sem ajuda de instrumentos) pertencem à Via Láctea. Estrelas das outras galáxias, mesmo as mais próximas, como as Nuvens de Magalhães, satélites da Via Láctea, só podem ser discernidas com auxílio de telescópios.

A estrela mais brilhante da constelação do Centauro é a Rigel Centaurus, ou Toliman, (alfa do Centauro), e é a estrela mais próxima do Sol. Na verdade, ela é um sistema estelar triplo onde a estrela Próxima Centauro é a mais próxima do Sol. Toliman, como foi batizada no passado, é de cor branca e se encontra a apenas 4,3 anos-luz. Essa proximidade é que faz com que ela pareça tão brilhante. Veremos na seção 2 como o brilho intrínseco de uma estrela se relaciona ao seu brilho aparente, e também como a temperatura da estrela define sua cor.

Gama do Cruzeiro, cujo nome próprio é Gacrux, é uma estrela gigante de cor vermelha localizada a cerca de 90 anos-luz do Sistema Solar. Ela está muito mais distante que alfa do Centauro, mas tem brilho aparente comparável. Isso é devido ao fato de gama do Cruzeiro ter um tamanho muito grande, que a torna muito luminosa. Veremos na seção 3 como se comparam as diversas categorias de estrelas, em função de suas temperaturas e tamanhos.

O fato de Gama do Cruzeiro ser uma gigante vermelha está associado a seu estágio evolutivo mais avançado que o Sol, por exemplo. Como veremos na seção 4, quando se aproxima o final de vida das estrelas, elas têm suas estruturas alteradas. Mas antes de falar da morte das estrelas, não podemos deixar de mencionar as principais etapas de suas vidas e os processos que possibilitaram seu nascimento. Os “berçários” de estrelas são as nuvens interestelares, compostas de gás e poeira que se encontram entre os braços espirais das galáxias. Um exemplo de nuvem interestelar da Via Láctea, conhecida por Saco de Carvão, encontra-se na direção do Cruzeiro do Sul. Ela aparece escura, contra o fundo brilhante de estrelas, justamente por conter altas concentrações



2- Quando atravessa um prisma, a luz branca é decomposta em diferentes cores na faixa visível (do vermelho ao violeta).

de poeira interestelar, bloqueando a passagem da luz das estrelas que se encontram atrás dela, para um observador da Terra.

Os exemplos destacados mostram como a contemplação de uma pequena região do céu (figura 1) pode ilustrar diversos aspectos do ciclo de vida das estrelas e que serão apresentados nas próximas seções.

7.2 PROPRIEDADES

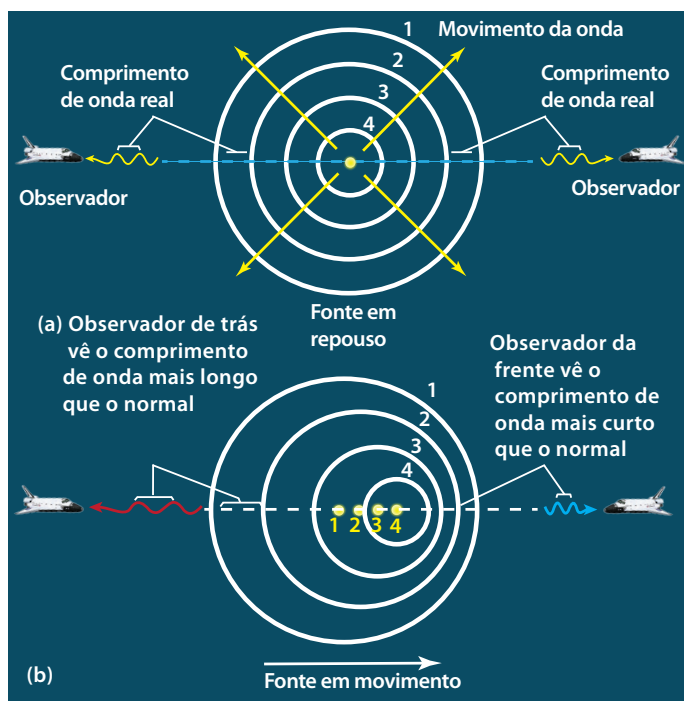
Como avaliar as características das estrelas?

A luz emitida pelos objetos astronômicos é o elemento chave para o entendimento da astrofísica. Informações sobre temperatura, composição química e estado dinâmico desses objetos são obtidas a partir da interpretação da radiação por eles emitida. Essa radiação é chamada eletromagnética por se tratar do transporte de energia por meio de flutuações dos campos elétrico e magnético. A luz pode ser observada em diferentes faixas espectrais: visível, infravermelho, ultravioleta, ondas de rádio etc.

7.2.1 LUZ PROVENIENTE DOS ASTROS: RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A radiação eletromagnética pode ser estudada em função de sua intensidade (fluxo de radiação), ou na forma de luz decomposta, formando um espectro, como ilustrado na figura 2. O espectro eletromagnético na chamada faixa do visível cobre comprimentos de onda desde o violeta (390 nm) até o vermelho (720 nm).

Quando uma fonte emissora de luz se movimenta em relação ao observador, a radiação emitida por ela sofre efeito Doppler, que modifica sua frequência ou o comprimento de onda. Se o movimento for de aproximação, a frequência aumenta. Neste caso diz-se que ocorreu um “desvio para o azul” (*blueshift*). Em situação oposta, a frequência diminui. Agora dizemos que ocorreu um “desvio para o vermelho” (*redshift*). A figura 3 ilustra os três casos: repouso, afastamento e aproximação.



3- Efeito Doppler observado em função do movimento da fonte emissora.

O deslocamento Doppler provocado pelo movimento é calculado pela expressão

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (1)$$

onde $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ é a diferença entre o comprimento de onda observado (λ) e o comprimento de onda emitido (λ_0), v é a velocidade da fonte em relação ao observador e c a velocidade da luz.

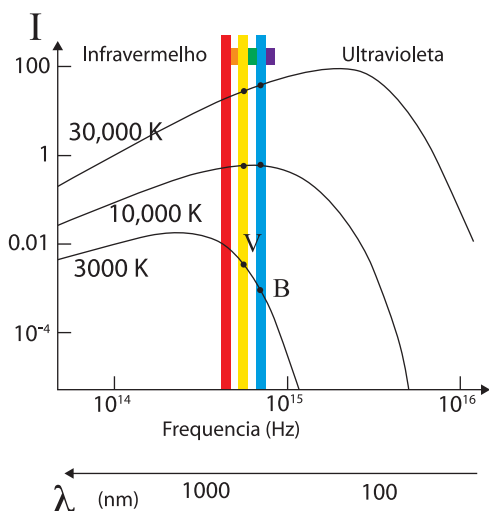
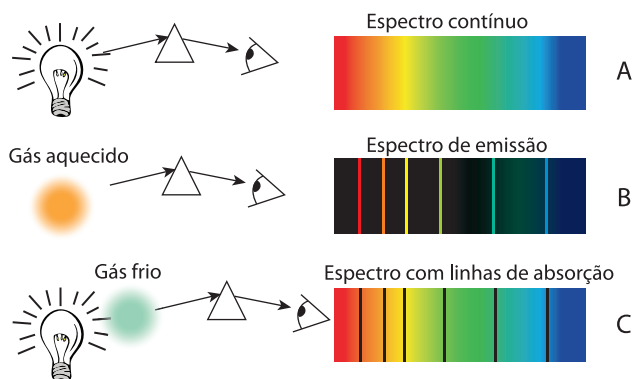
Além dos fenômenos puramente ondulatórios, a radiação interage com a matéria na forma de átomos ou moléculas. Esse processo requer que a radiação eletromagnética tenha características de pacotes discretos ou quanta (plural de quantum) de energia. No caso da luz visível, os quanta são chamados fótons, cuja energia é proporcional à frequência.

Linhas espectrais são formadas pela emissão ou absorção de fótons, pelas mudanças na quantidade de energia em um determinado átomo.

As regras que estabelecem a emissão e a absorção de radiação são determinadas pelas três leis de Kirchhoff: 1) Um objeto que esteja no estado sólido, líquido ou gasoso, e sob alta pressão, produzirá um espectro contínuo de emissão, quando aquecido; 2) Um gás a baixa pressão e a temperatura suficientemente alta produzirá um espectro de linhas brilhantes de emissão; 3) Um gás em baixa pressão e baixa temperatura, que se localize entre uma fonte de radiação contínua e um observador, produzirá um espectro com linhas de absorção, ou seja, um conjunto de linhas superpostas ao espectro contínuo.

A figura 4 ilustra três situações distintas que envolvem uma fonte de radiação contínua (uma lâmpada, por exemplo), uma nuvem de gás e o observador. O observador que vê diretamente a fonte de radiação contínua obtém um espectro contínuo (caso A). Quando observa apenas a nuvem de gás aquecido o observador obtém um espectro de emissão – linhas brilhantes (B). No caso em que um gás frio é colocado entre a fonte de radiação contínua e o observador, o espectro obtido apresenta linhas escuras de absorção (C). As linhas de absorção aparecem precisamente nos mesmos comprimentos de onda em que aparecem as linhas de emissão.

4- Ilustração das leis de Kirchhoff: (a) Espectro observado quando a radiação de uma lâmpada é decomposta ao atravessar um prisma; (b) espectro de um gás aquecido; (c) espectro da lâmpada quando a luz atravessa um gás frio, contendo linhas espectrais de absorção (escuras).



5- Curvas de distribuição de energia do corpo negro para diferentes temperaturas. A altura da curva define a cor da estrela. Temperaturas elevadas correspondem a cores mais azuladas, ao contrário das baixas temperaturas que correspondem a cores mais avermelhadas.

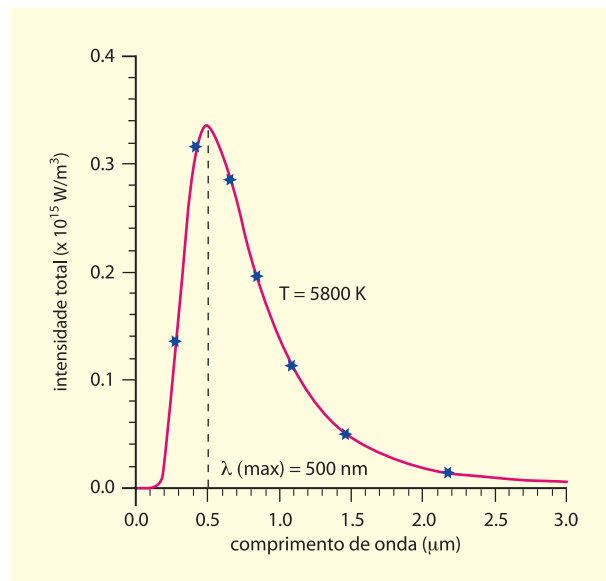
7.2.2 TEMPERATURA E COR DAS ESTRELAS

Em geral, quando se fala em temperatura de estrelas refere-se à temperatura da fotosfera (como no caso do Sol). A depender das características da estrela, a temperatura fotosférica pode atingir dezenas de milhares de graus, bem mais quente que o Sol, mas ainda bem inferior aos milhões de graus encontrados no interior das estrelas. Como visto, o espectro de radiação de um corpo está associado à sua temperatura pela lei de radiação de Planck (radiação de corpo negro), que fornece a intensidade da radiação em função do comprimento de onda.

A figura 5 ilustra curvas de corpo negro obtidas com as equações acima, quando se considera diferentes temperaturas. O ponto de intensidade máxima de cada curva é expresso pela lei de Wien. Por ele pode-se determinar a cor predominante da estrela na faixa do visível. Utilizando o comprimento de onda em centímetro e temperatura em K, a lei de Wien é expressa por:

$$\lambda_{\max}(\text{cm}) = \frac{0,29}{T(\text{K})} \quad (2)$$

Exemplificando: como se pode determinar a temperatura fotosférica do Sol e o comprimento de onda do pico de emissão (ou sua cor) a partir da observação? Usando filtros especiais é possível



6- Observando a radiação do Sol em muitas frequências notamos que o pico encontra-se na parte visível do espectro e que ele emite muito mais no infravermelho que no ultravioleta.

observar o Sol em diferentes comprimentos de onda e medir a intensidade (pontos azuis na figura 6). Em seguida, usando a lei de Planck procuramos a curva de corpo negro que melhor se ajusta aos pontos observados, alterando a temperatura (curva em vermelho). A temperatura correspondente à curva ajustada representa a temperatura fotosférica (5.800 K). Para determinar o pico de intensidade máxima, substituímos essa temperatura na lei de Wien. Fazendo a aritmética encontraremos $\lambda_{\text{max}} = 5 \times 10^{-5} \text{ cm} = 500 \text{ nm}$.

No caso da estrela Antares, uma estrela gigante vermelha bastante fria, a temperatura é da ordem de 3.000 K e $\lambda_{\text{max}} \sim 1.000 \text{ nm}$. Sirius, uma estrela azulada muito quente, tem temperatura da ordem de 10.000 K e $\lambda_{\text{max}} \sim 290 \text{ nm}$.

A soma do fluxo de energia em todas as frequências determina o fluxo total emitido por uma estrela, que pode ser expresso por:

$$F_* = \sigma T^4 \quad (1)$$

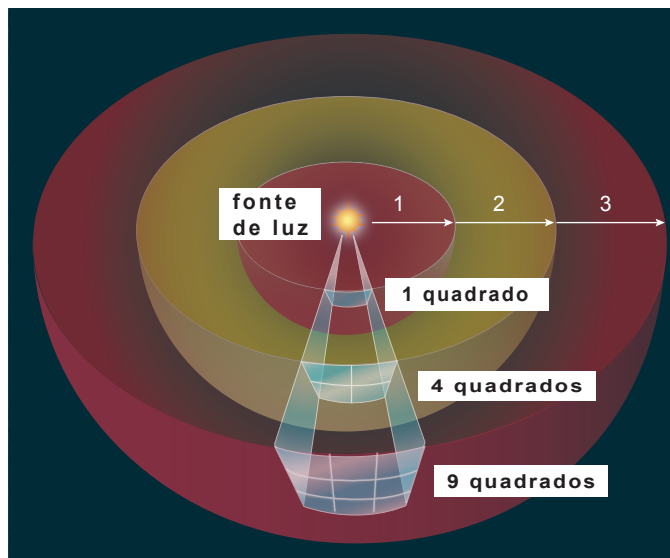
onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1}$ é a constante de Stefan–Boltzmann.

7.2.3 LUMINOSIDADE (L_*): O BRILHO INTRÍNSECO DA ESTRELA

Consideremos uma estrela esférica de raio R_* localizada a uma distância d do observador. A luminosidade L_* dessa estrela é a energia total (potência) emitida em todas as direções, por unidade de tempo.

No sistema internacional de unidades, a luminosidade é expressa em Watt (Joule/s). Essa energia produzida no interior da estrela passa pela sua superfície, cuja área é $A_* = 4\pi R_*^2$. O fluxo de energia é a potência emitida por unidade de área (Watts/m²), ou seja:

$$F(R_*) = \frac{L_*}{4\pi R_*^2} \quad (2)$$



7- O brilho aparente (fluxo detectado) diminui com o quadrado da distância.

Como o fluxo é dado por σT^4 , a luminosidade pode ser expressa da seguinte forma:

$$L_* = 4\pi R_*^2 \sigma T_*^4 \quad (3)$$

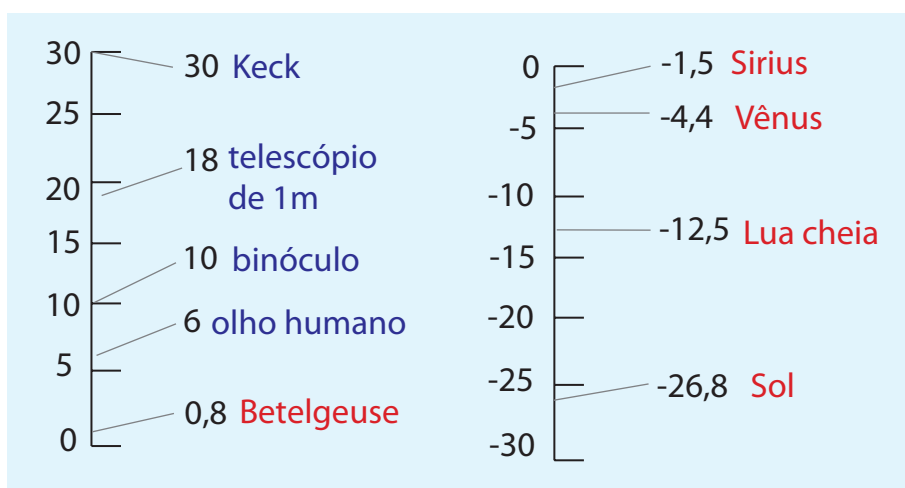
Portanto, a luminosidade é uma característica intrínseca da estrela e só depende de sua temperatura (T_*) e do seu tamanho (R_*). Já o fluxo depende do local onde é medido, ou da distância da estrela. Quanto mais distante estiver a estrela, mais fraca ela parecerá. Essa diminuição do brilho aparente está relacionada com a área da esfera que tem como raio a distância da estrela. A energia que passa pela área da estrela deverá passar também pela área dessa esfera fictícia. A figura 7 ilustra a relação entre áreas atravessadas pelo mesmo feixe de luz. Assim, quanto maior a distância, maior a área da esfera fictícia e menor o fluxo de energia que passa por ela.

Esse fluxo que representa o brilho aparente pode ser expresso por um número, denominado magnitude aparente.

7.2.4 MAGNITUDE: O BRILHO APARENTE DAS ESTRELAS

Uma forma de medir o brilho das estrelas é avaliar a quantidade de fótons recebida em um sensor, seja ele um instrumento imageador acoplado a um telescópio, uma câmara fotográfica, ou mesmo o olho humano. Esse brilho é chamado aparente, pois ele depende da distância da estrela.

A magnitude aparente é uma escala para comparação do brilho das estrelas desenvolvida pelo astrônomo grego Hiparco (190-126 a.C.) há mais de dois mil anos. Quanto maior a magnitude aparente, menor é o brilho aparente. Hiparco imaginou uma escala de brilho onde as estrelas mais brilhantes foram classificadas com magnitude 1 e as mais fracas (quase imperceptíveis ao olho humano) com magnitude 6. Todas as demais estrelas estariam dentro dessa faixa de magnitudes. Com instrumentação moderna, podemos constatar que uma estrela de magnitude 1 é 100 vezes mais brilhante que uma estrela com magnitude 6. Portanto, um intervalo de 5 magnitudes corresponde a um fator 100 de brilho (fluxo). Logo, a escala de brilho de Hiparco, baseada no olho humano, é $\sqrt[5]{100} = 100^{1/5} = 2,512$. Ou seja, uma diferença de uma magnitude implica em razão de brilho de 2,512. Uma estrela de magnitude 1 é duas vezes e meia mais brilhante que



8- A escala de magnitudes aparentes e o limite de detecção de alguns telescópios e magnitude aparente de alguns astros.

uma estrela de magnitude 2, que também é duas vezes e meia mais brilhante que uma estrela de magnitude 3 e assim por diante.

Isso evidencia que a resposta sensorial humana aos estímulos externos é logarítmica, fato já conhecido desde a metade do século 19. Em 1856, o astrônomo inglês Norman Robert Pogson (1829-1891) apresentou uma fórmula matemática que ajustava a escala magnitude de Hiparco à resposta logarítmica do olho humano. Se a distância da estrela for d , o fluxo será:

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (4)$$

e a magnitude será assim definida:

$$m = -2,5 \log F \quad (5)$$

O sinal negativo é para impor a relação inversa entre magnitude e brilho, ou seja, a magnitude aumenta quando o fluxo diminui. Combinando as duas expressões teremos:

$$m = -2,5 \log \frac{L}{4\pi d^2} = -2,5 \log L - 2,5 [-\log 4\pi d^2] = -2,5 \log L + 4\pi + 2,5 \log d^2 \quad (6)$$

$$m = C - 2,5 \log L + 5 \log d$$

onde $C = 2,5 \log 4\pi$ é uma constante que define o ponto zero da escala e depende do sistema fotométrico adotado.

Um exemplo da escala de magnitudes aparentes é mostrado na figura 8, apresentando a escala de magnitudes aparentes de alguns objetos (em vermelho) e o poder de alcance dos instrumentos (em azul).

7.2.5 DISTÂNCIAS: MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO

Pode-se determinar a distância de uma estrela pela comparação do brilho observado (magnitude

aparente) com o brilho intrínseco (magnitude absoluta). Define-se magnitude absoluta (M) como a magnitude que a estrela teria se estivesse localizada a uma distância padrão de 32,6 anos-luz ou 10 parsec. Se todas as estrelas estivessem à distância de 10 pc, a magnitude aparente representaria o brilho intrínseco delas, ou seja, suas luminosidades.

Lembrando que $m = -2,5 \log (L/4\pi d^2)$, podemos usar a diferença entre a magnitude aparente m (que pode ser observada) e a magnitude absoluta M (que pode ser obtida conhecendo-se a luminosidade da estrela) para obter a distância das estrelas. Por essa razão, a diferença “ $m - M$ ” é conhecida como módulo de distância:

$$\begin{aligned} m - M &= (-2,5 \log L + 5 \log d) - (-2,5 \log L + 5 \log 10) \\ m - M &= 5 \log d - 5 \log 10 \\ m - M &= 5 \log \frac{d}{10} \end{aligned} \quad (7)$$

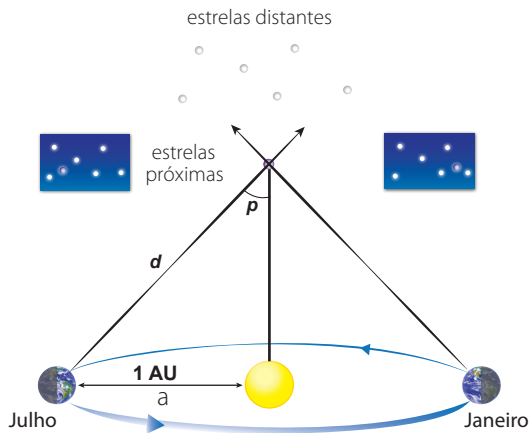
onde d é a distância da estrela dada em parsec.

A expressão se aplica no caso de ausência de matéria opaca entre as estrelas e o observador. Havendo matéria opaca, parte da radiação estelar é extinta pela matéria implicando na diminuição do brilho aparente e no aumento da magnitude aparente.

O método de estimativa de distâncias pelo módulo de distância requer o conhecimento da magnitude absoluta da estrela. Isso não é simples de se determinar, pois depende do brilho intrínseco (luminosidade) da estrela, que, por sua vez, não é diretamente observável. Dessa forma, recorremos a outros métodos para se determinar as distâncias das estrelas.

• *Paralaxe trigonométrica*

Paralaxe é a alteração da posição aparente de um objeto devida ao movimento do observador. Ela é medida em ângulo, geralmente em segundos de arco ("). Para medir a paralaxe deve-se observar o objeto a partir de dois pontos de uma mesma linha de base e medir o ângulo de deslocamento da linha de visada (figura 9).



9- Observações de uma mesma estrela feitas em janeiro e em julho, de forma que a linha de base tenha um comprimento de duas UA. Essa geometria é utilizada para se medir o ângulo paralático, ou seja a paralaxe da estrela.

Para se medir a paralaxe das estrelas, comparamos imagens de uma mesma região do céu tomadas em épocas diferentes, por exemplo, com seis meses de diferença. Neste caso, a linha de base será aproximadamente duas unidades astronômicas (1 UA) equivale à distância entre a Terra e o Sol, ou seja, 150 milhões de quilômetros, pois a Terra estará do lado oposto ao que estava em sua órbita. Quanto mais distante a estrela, menor sua paralaxe. Para pequenos ângulos a tangente é aproximadamente igual ao próprio ângulo. Se a paralaxe p for muito menor que 1 (figura 9), $\tan p \sim p$. Logo, podemos deduzir que:

$$d = \frac{1UA}{p} \quad (8)$$

sendo p expresso em radianos (rd). Sabemos que $1 \text{ rd} = 206265''$, logo $1' = (1/206265) \text{ rd}$. Substituindo $p = (1/206265) \text{ rd}$ na equação acima e resolvendo a aritmética concluímos que a paralaxe de $1''$ corresponde a uma distância de 206.265 UA (3,3 anos-luz ou $3,1 \times 10^{16} \text{ m}$).

Por convenção, define-se essa distância como sendo de 1 parsec (pc)¹. Se conhecermos a medida da paralaxe (p'') podemos calcular a distância da estrela em parsec. Uma estrela com $p = 0,1''$, por exemplo, encontra-se a uma distância de 10pc. Se a paralaxe for dada em radianos, teremos a distância dada em unidades astronômicas.

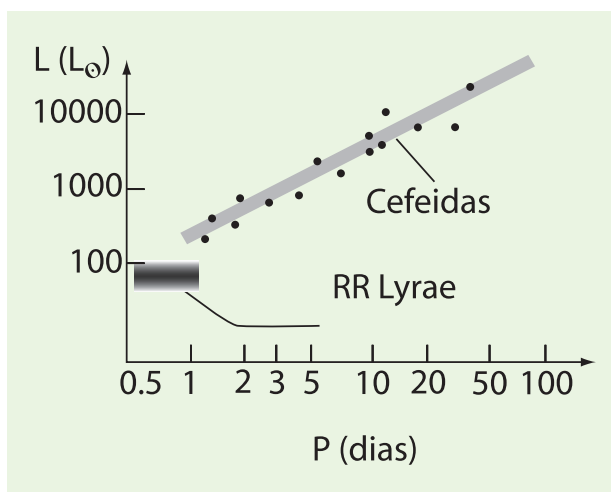
É evidente que a estrela que apresenta a maior paralaxe é a mais próxima do Sol, ou seja, Alfa Centauro. Sua paralaxe é $p = 0,76''$, que implica na distância de 1,3 pc (4,3 anos-luz). Atualmente, as maiores distâncias determinadas pela paralaxe trigonométrica são aquelas medidas pelo satélite Hiparco. A paralaxe trigonométrica presta-se para determinar distâncias de até 100 pc.

• Método para determinação de distâncias além de nossa Galáxia

O ângulo paralático é cada vez menor, quanto maior for a distância da estrela, por isso para objetos mais longínquos utiliza-se o método da paralaxe espectroscópica ou diagrama cor-magnitude. A determina-

1. Parsec (*par* = paralaxe, *sec* = segundo em inglês) é uma contração de "paralaxe de um segundo de arco".

10- Gráfico do período de pulsação (P) versus luminosidade (L) para as Cefeidas, mostrando a boa correlação entre P e L . Também são mostrados os períodos de pulsação das estrelas variáveis RR Lyrae.



ção de distâncias em função da luminosidade (brilho intrínseco) das estrelas depende da comparação entre o brilho aparente e o tipo espectral da estrela, capaz de revelar sua magnitude absoluta. Esse método, que utiliza módulo de distância, é chamado paralaxe² espectroscópica. O tipo espectral e a classe de luminosidade de uma estrela são determinados pelo seu espectro. A magnitude aparente se obtém da observação. A magnitude absoluta pode ser determinada em um diagrama que relaciona a magnitude absoluta com a cor da estrela. Dessa forma, esse procedimento também é conhecido por método do diagrama cor-magnitude. Ele é útil para se determinar distâncias até 10 kpc (10.000 pc).

Simplificadamente, o processo é o seguinte: pela observação determina-se a magnitude aparente (m) da estrela e registra-se seu espectro. Pela análise do espectro classifica-se a estrela em um dos tipos espectrais. Em seguida, no diagrama cor-magnitude (figura 13) localiza-se o tipo espectral (eixo das abscissas) da estrela em questão e determina-se a magnitude absoluta (M) correspondente (eixo das ordenadas). Finalmente, substitui-se m e M na equação dada na página 181 e determina-se a distância d .

A variabilidade de luz apresentada por algumas estrelas também é um bom método para determinação de distâncias extragalácticas. As Cefeidas formam uma categoria de estrelas variáveis pulsantes. O período de pulsação está diretamente associado à luminosidade da Cefeida, por isso é chamado relação período-luminosidade das Cefeidas (figura 10). Conhecendo-se o período de pulsação (P), obtém-se a luminosidade (L).

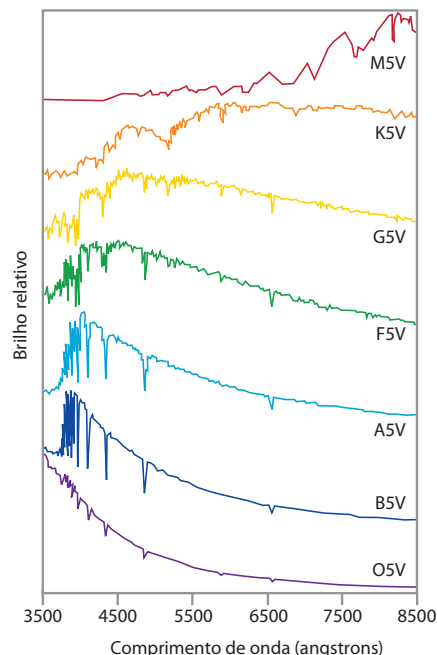
7.3 CLASSIFICAÇÃO - AS ESTRELAS NÃO SÃO IGUAIS

7.3.1 ESPECTROS ESTELARES

Para obtenção do espectro de uma estrela, a radiação que chega ao telescópio em forma de luz deve ser dispersa em comprimento de onda por um espectrógrafo (da mesma forma que a luz branca é

2. O termo “paralaxe” é utilizado apenas de forma figurativa, pois nesse método não há medidas angulares envolvidas na determinação de distâncias.

11- Espectros de estrelas de diferentes temperaturas. A primeira estrela na base do diagrama tem 30.000 K, a segunda tem 20.000 K, diminuindo até chegar na última acima, com temperatura de 3.000 K.



12- A primeira classificação das estrelas foi desenvolvida no Observatório de Harvard por Annie Jump Cannon e colaboradores, em 1910 (www.twu.edu/dsc).

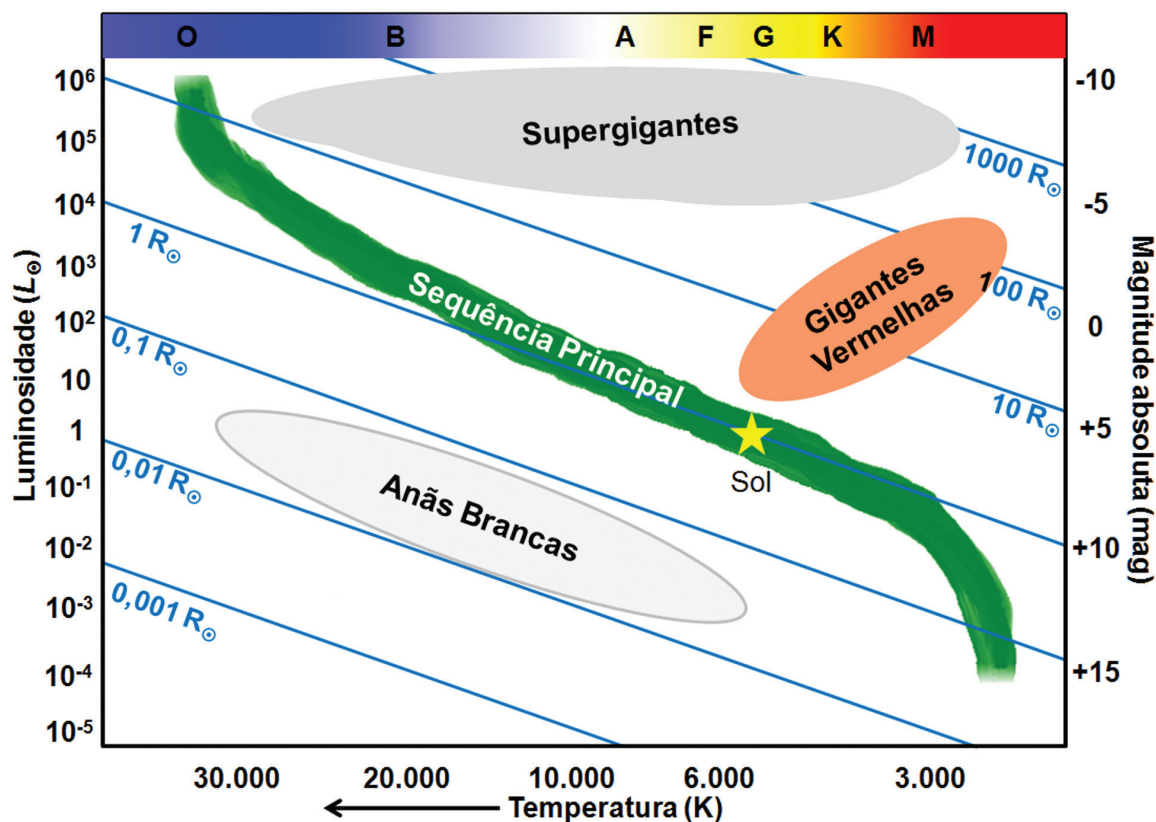
decomposta em várias cores ao passar por um prisma). Essa luz dispersada é então registrada em imagem, atualmente digital. Pela comparação entre a posição das linhas espectrais da estrela observada e a posição das linhas espectrais de laboratório obtidas de uma lâmpada de calibração, pode-se identificar os respectivos comprimentos de onda das linhas e os elementos químicos que as formaram. Dessa forma, estrelas sob condições físicas diferentes devem necessariamente apresentar espectros diferentes. Na figura 11 são mostrados espectros de sete estrelas, para comprimentos de onda entre 350 e 850 nanômetros (nm). Todos os espectros apresentam linhas de absorção (depressões) sobrepostas a um contínuo, mas o padrão de linhas difere de um espectro para o outro. Para determinados comprimentos de onda, em algumas estrelas, as linhas de absorção aparecem mais fortes (maior profundidade) que em outras. Os espectros da figura 11 correspondem a estrelas com composição química semelhante a do Sol. Nesse caso, as diferenças espectrais encontradas se devem unicamente às diferenças de temperatura.

7.3.2 A ORDEM DOS TIPOS ESPECTRAIS

No início do século passado, quando ainda não se compreendia como os átomos produziam linhas espectrais, as primeiras classificações das estrelas foram baseadas nas intensidades das linhas do hidrogênio. Foi adotada a sequência A, B, C...P, para a nomenclatura das classes espectrais, onde estrelas tipo A tinham as linhas de hidrogênio mais fortes. As intensidades das linhas diminuíam quando se ia de A a P.

Com o melhor entendimento dos subníveis de energia da estrutura atômica um novo esquema foi adotado para a classificação espectral por volta de 1920 e estabeleceu uma sequência mais significativa em função da temperatura da estrela. Assim, algumas letras foram suprimidas e a ordem alterada, resultando em O,B,A,F,G,K,M.

As estrelas de tipo mais próximo de O, no início da sequência, são chamadas estrelas de primeiros tipos (do inglês *early type*), enquanto os tipos mais próximos de M, no final da sequência são chamados tipos tardios (*late type*). Cada tipo é subdividido em dez grupos, de 0 (primeiros) a 9 (tardios), como por exemplo: ...F8, F9, G0, G1, G2...G9.



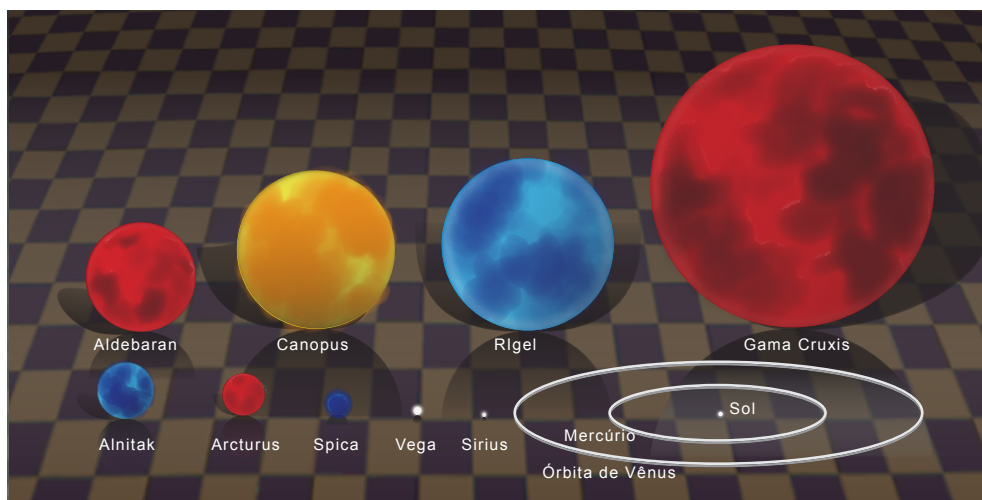
13- Diagrama H-R onde se comparam Brilho (luminosidade, raio) e Cor (temperatura).

7.3.3 COMPARANDO AS DIVERSAS CATEGORIAS DE ESTRELAS

Na classificação das estrelas, luminosidade e temperatura superficial são parâmetros que têm papel semelhante ao peso e altura de uma pessoa, para classificar seu tipo físico. Sabemos que, nos humanos, essas características são bem correlacionadas, ou seja, normalmente espera-se que pessoas mais altas tenham maior peso que as de menor estatura. Assim, também os astrônomos procuram correlacionar os parâmetros estelares.

No início do século 20, o astrônomo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967) e o norte-americano Henry Norris Russel (1877-1957), descobriram de forma independente que brilho intrínseco e temperatura estelar se correlacionam ao tamanho das estrelas. Por isso, gráficos que comparam esses parâmetros para diferentes categorias de estrelas recebem o nome de Diagrama Hertzsprung-Russel ou, simplesmente, diagrama H-R. Convencionou-se colocar neste diagrama a magnitude absoluta (ou luminosidade) no eixo das ordenadas e a sequência de tipos espectrais (ou temperatura) no eixo das abscissas. Nesse caso, a escala de temperatura é invertida, ou seja, as temperaturas maiores ficam à esquerda do gráfico e as menores à direita.

De acordo com o diagrama H-R esquemático da figura 13, a faixa em que se encontra o Sol é conhecida como Sequência Principal e representa a fase evolutiva em que a maioria das estrelas se



14- Escalas de tamanho: estrelas anãs, gigantes, e supergigantes (crédito: Gastão B. Lima Neto – IAG/USP).

encontra. Estrelas dessa faixa próximas ao Sol têm praticamente a mesma temperatura e luminosidade. Um exemplo é Alfa do Centauro. Seguindo a faixa, estrelas que ficam à esquerda do Sol são mais quentes e luminosas, como Sirius. Já as estrelas que ficam à direita do Sol, são mais frias e menos brilhantes. No canto superior esquerdo estão as estrelas mais quentes, mais massivas e mais luminosas; no canto inferior direito estão as menos massivas, mais frias e menos luminosas.

Outras fases evolutivas são as das gigantes e supergigantes. Betelgeuse, alfa de Órion, por exemplo, é uma estrela mais fria que o Sol, mas de raio muito maior, o que lhe garante maior luminosidade. Dessa forma, as estrelas podem ser separadas no diagrama H-R de acordo com sua categoria. O Sol é considerado uma estrela anã, enquanto Betelgeuse é uma supergigante. Estrelas muito quentes e muito menores que o Sol, localizadas na região esquerda, próxima da base do Diagrama H-R, formam a categoria das anãs brancas.

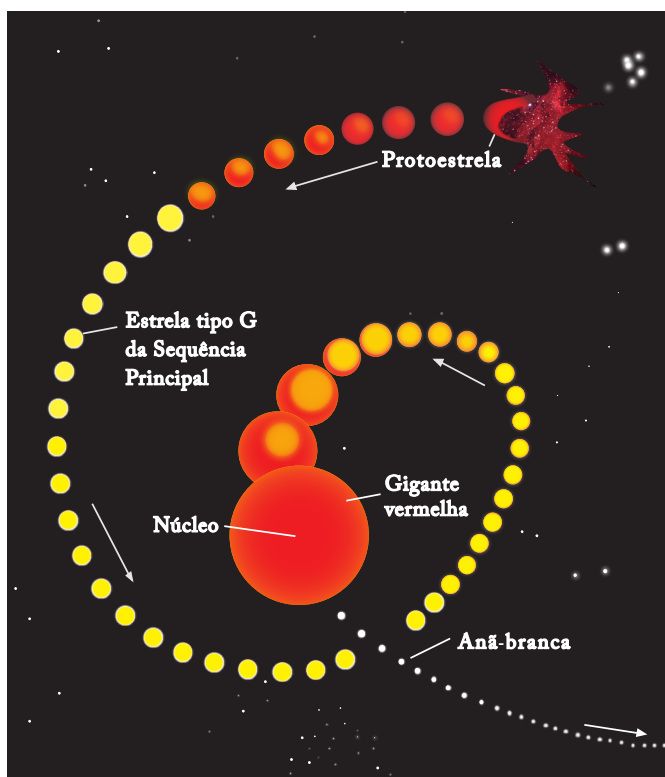
7.3.4 O TAMANHO DAS ESTRELAS

A luminosidade da estrela está relacionada à sua área superficial e ao fluxo total emitido, que é proporcional à temperatura elevada à quarta potência. A expressão da luminosidade integrada em todo o espectro é a $L_e = 4\pi R_e^2 \sigma T_e^4$. Isso mostra a importância do tamanho estelar no seu brilho intrínseco.

A figura 14 mostra os tamanhos relativos entre algumas estrelas e o Sol.

Para diferenciar os tamanhos de estrelas de mesmo tipo espectral, novamente recorreremos ao estudo das linhas espectrais. A atmosfera de uma estrela gigante tem densidade menor que a de uma estrela anã que, por sua vez, tem atmosfera bem menos densa que a de uma anã-branca (pequena de cor branca). Como as linhas espectrais são muito sensíveis à densidade das fotosferas, podemos usar as linhas espectrais para identificar a fase evolutiva da estrela.

Como a densidade da estrela também se relaciona com sua luminosidade, estabeleceu-se um esquema de identificação para os diferentes tipos de estrelas, chamado classe de luminosidade. Nesse esquema, as classes Ia e Ib se referem, respectivamente, às supergigantes brilhantes e às supergigantes. As classes II e III são, respectivamente, das gigantes brilhantes e gigantes. As classes IV e V referem-se, respectivamente, às estrelas subgigantes e às estrelas da sequência principal e anãs.



15- Esquema do ciclo de vida de uma estrela semelhante ao Sol.

As diferentes distribuições das estrelas no diagrama H-R ou cor-magnitude (figura 13) estão relacionadas às fases evolutivas, que dependem da massa das estrelas. Uma estrela de massa muito baixa (centésimos da massa solar) pode permanecer na sequência principal por trilhões de anos, enquanto as massivas (dezenas de massas solares) permanecem por alguns milhares de anos. Esse tempo de vida está relacionado à taxa de consumo do material estelar, que varia com a massa e a luminosidade da estrela.

7.4 EVOLUÇÃO DAS ESTRELAS

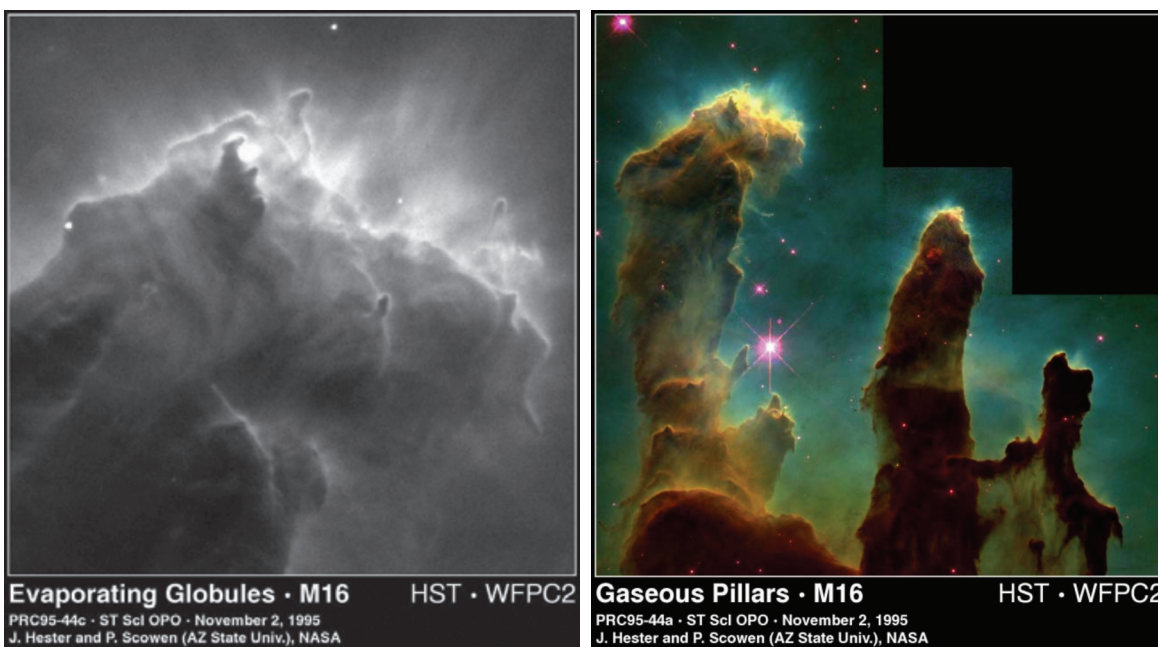
Apesar de ser bastante longo, o período de vida de uma estrela é finito. A seguir, abordaremos a juventude das estrelas, uma fase conhecida como pré-sequência principal, os mecanismos de geração de energia no interior estelar que caracterizam a fase de “maturidade” da estrela, já definida como sequência principal, e os estágios finais da vida de estrelas, fortemente influenciados pela massa.

7.4.1 NASCIMENTO: ONDE SÃO FORMADAS AS ESTRELAS?

Mesmo para uma estrela, ser jovem é estar passando por processos de intensa atividade, constantes modificações e instabilidades. Nessa fase ela passa por variações de temperatura, massa e diâmetro. Quando chega à fase de sequência principal ela ainda é relativamente jovem e a fusão de hidrogênio no seu interior iniciou-se “recentemente”. Na maioria dos casos, essa é uma fase duradoura e de relativa estabilidade. Para o Sol, por exemplo, o tempo total de permanência na sequência principal é de cerca de 11 bilhões de anos (perto de 4,6 bilhões de anos já se passaram). Nesse período ele terá relativa estabilidade e liberará energia pela fusão do hidrogênio em seu interior.



16- Imagem de duas galáxias indicando regiões onde se encontram as nuvens interestelares. Essas regiões entre os braços espirais aparecem escuras na imagem óptica da Galáxia M 81 (esquerda). Já na imagem infravermelha da galáxia Sombrero (direita), a região que contém poeira, distribuída no plano galáctico, aparece brilhante (HST/NASA/ESA www.spacetelescope.org/static/archives/images/original/heic0710a.tif, www.spacetelescope.org/static/archives/images/original/opo0328b.tif).



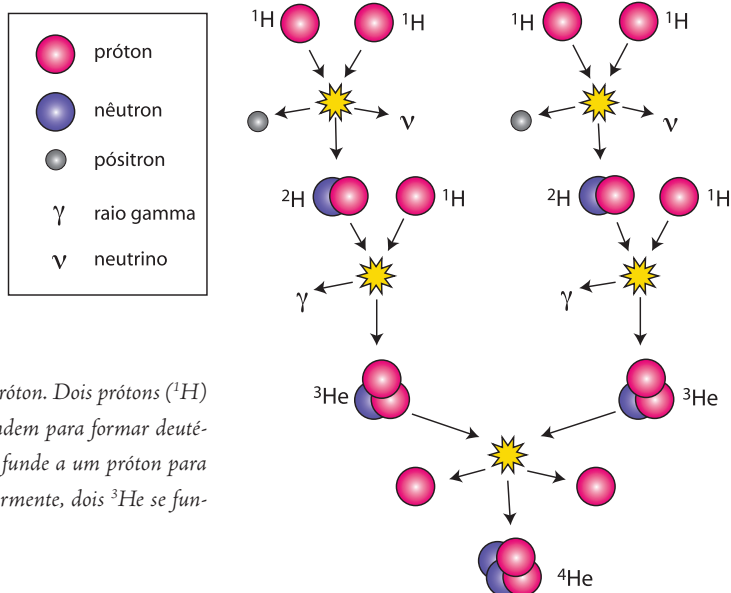
17- Nebulosa da Águia (M16) e suas grandes concentrações de gás e poeira na forma de pilares (direita) e de glóbulos (acima) [HST/NASA/ESA].

Numa galáxia podem existir várias regiões de formação de estrelas. Essas regiões são preenchidas por nuvens de gás e poeira e encontradas entre os braços espirais (figuras 16 e 17). Essas regiões são consideradas berçários de estrelas.

7.4.2 VIDA: PRODUÇÃO DE ENERGIA E ELEMENTOS QUÍMICOS

A condição para ocorrência de fusão nuclear é que os núcleos atômicos devam estar suficientemente próximos uns dos outros. Essa aproximação não é simples, pois os núcleos têm carga positiva³ e

3. Os núcleos são basicamente formados de prótons e nêutrons.



18- Etapas da cadeia próton-próton. Dois prótons (^1H) - núcleos de hidrogênio - se fundem para formar deutério (^2H ou D). O deutério se funde a um próton para formar o isótopo ^3He . Posteriormente, dois ^3He se fundem para formar o ^4He .

a repulsão elétrica entre eles impede a aproximação necessária para que a fusão ocorra. No interior de uma estrela em contração, a temperatura aumenta cada vez mais, proporcionando altas velocidades aos núcleos atômicos. Assim, alguns deles terão energia necessária para superar a repulsão elétrica e permitir a fusão nuclear. Quando a parte central da estrela jovem se aquece o suficiente, iniciam-se os processos de fusão nuclear, liberando energia necessária para a estrela compensar a contração gravitacional.

• Origem da energia termonuclear

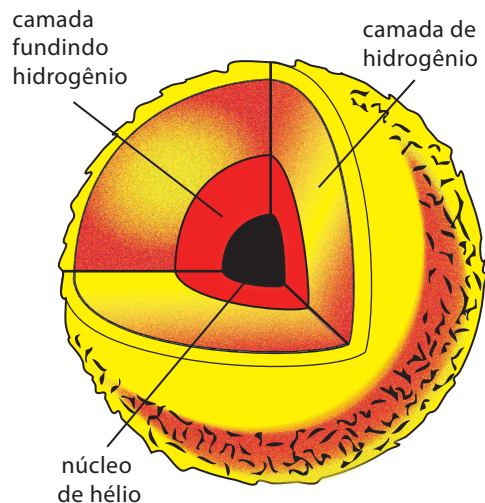
Os processos de fusão inicial envolvem quatro núcleos de hidrogênio para formar um núcleo de hélio. Enquanto o hidrogênio tem apenas um próton no núcleo, o hélio dispõe de dois prótons e dois nêutrons. A massa do núcleo de hélio assim formado é um pouco menor que a soma das massas dos quatro núcleos de hidrogênio utilizados. Essa diferença de massa, que corresponde a 0,07% da massa do hidrogênio, será convertida em energia no interior estelar⁴. Como na sequência principal 90% dos átomos da estrela são de hidrogênio, ela tem armazenada uma grande quantidade de combustível para o processo de fusão termonuclear.

O processo dominante de fusão nuclear em estrelas cuja temperatura central é menor que 15×10^6 K é conhecido como cadeia próton-próton, ilustrada na figura 18. Na primeira etapa, dois átomos de hidrogênio se fundem para formar um núcleo de deutério (^2H ou D), um pósitron (e^+ , elétron com carga positiva) e um neutrino (ν , partícula subatômica). O neutrino imediatamente escapa da estrela, mas o pósitron logo colide com um elétron e ambos são aniquilados⁵, liberando energia.

Na segunda etapa, o núcleo de deutério se funde a outro núcleo de hidrogênio e forma um isótopo de hélio (^3He) com dois prótons e um nêutron, liberando ainda energia na forma de fótons (γ). Na terceira etapa, dois desses isótopos se fundem para formar um átomo de hélio (^4He) e dois

4. Apesar de muito pequena, essa fração de massa é convertida em energia pela expressão $E = mc^2$. Como a velocidade da luz (c) é muito alta, a porção de energia gerada também atinge valores elevados.

5. O elétron tem carga negativa, é uma partícula de matéria. O pósitron é um elétron de carga positiva, por isso é considerado uma partícula de antimatéria. Matéria e antimatéria têm as mesmas características, mas as cargas elétricas são opostas. Quando se chocam, ambas são aniquiladas e produzem fótons de altíssima energia (raios gama).



19- Representação esquemática do interior de uma estrela semelhante ao Sol, produzindo hélio em seu interior.

núcleos de hidrogênio. Assim, um total de seis núcleos de hidrogênio está envolvido nas reações, mas apenas quatro deles são utilizados para formar o hélio.

• *Uma fase de estabilidade: a sequência principal*

Uma vez estabelecidos os processos termonucleares, eles se autocontrolam. Quando a produção de energia nuclear aumenta, a pressão local também aumenta e a estrela expande. Com o aumento do tamanho, o gás no interior da estrela esfria e a produção de energia diminui.

Assim, a estrela acaba encontrando a temperatura e o tamanho ideais para o equilíbrio, permitindo que fique estável por um longo período. Essa fase de estabilidade, em que a estrela permanece a maior parte de sua vida, é a chamada sequência principal.

Quanto mais massiva a estrela, maior a temperatura necessária, em seu interior para que ela seja capaz de compensar a contração da gravidade. As estrelas mais quentes e mais massivas têm alta luminosidade superficial e consomem seu combustível a taxas muito mais altas que estrelas menos massivas, portanto têm um tempo de vida mais curto.

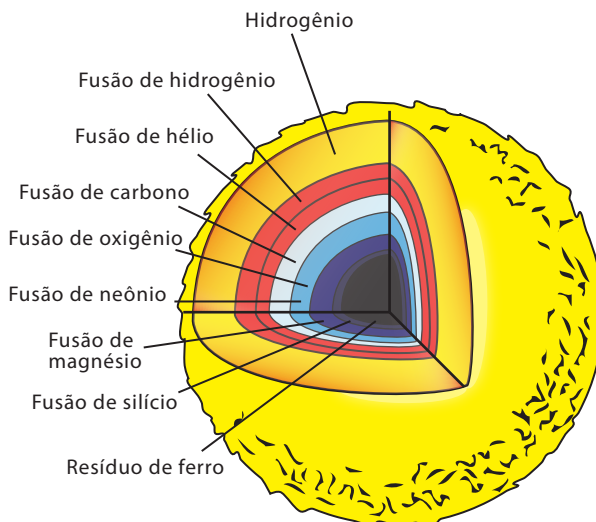
• *Origem dos elementos químicos*

Na fusão nuclear pela cadeia próton-próton, quatro núcleos de hidrogênio formam um núcleo de hélio e libera energia. Na região interna da estrela, submetida a temperaturas entre 10^7 K e 10^8 K, forma-se uma camada onde ocorre a “fusão” de H ao redor de um caroço de He ainda inerte, mostrado na figura 19.

Caso a estrela tenha massa suficiente para gerar temperaturas internas mais elevadas, os processos termonucleares prosseguem formando elementos cada vez mais pesados. A fusão do hélio gera o carbono, que por sua vez forma o oxigênio e assim por diante, até chegar à síntese do ferro, como ilustrado na figura 20.

Esse processo de formação dos elementos químicos recebe o nome de nucleossíntese e se divide em:

- Nucleossíntese primordial: é a nucleossíntese que ocorreu nos primeiros minutos após a origem do Universo, formando ^1H (hidrogênio), ^3H (trítio), ^4He (hélio) e ^7Li (lítio);
- Nucleossíntese estelar: que ocorre nas estrelas. Ela pode ser “quiescente”, ao longo da vida da estrela, ou “explosiva”, na morte de estrelas massivas;



20- Interior de uma estrela massiva evoluída. As camadas se distribuem na forma de camadas concêntricas (como cascas de cebola), que contêm progressivamente elementos mais pesados, raios cada vez menores e temperaturas mais elevadas.

• Nucleossíntese interestelar: os raios cósmicos interagem com gás para produzir elementos leves (${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ e ${}^{11}\text{B}$).

7.4.3 MORTE: ESTÁGIOS FINAIS DA EXISTÊNCIA DE UMA ESTRELA

Após chegar à sequência principal a estrela entra numa fase de tranquilidade e estabilidade, suas características não se alteram e assim ela permanece cerca de 90% de sua vida. Durante essa fase de sequência principal, no núcleo da estrela ocorre a lenta transformação do hidrogênio em hélio. A força gravitacional e força de pressão de radiação⁶ se equilibram. Quando termina todo hidrogênio do núcleo, esse equilíbrio se altera e modifica a estrutura interna da estrela e sua aparência externa. Nesse estágio, a estrela deixa a sequência principal e inicia fase final de sua vida.

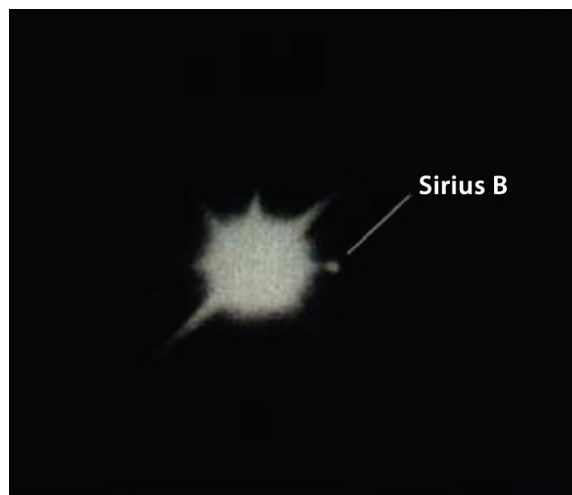
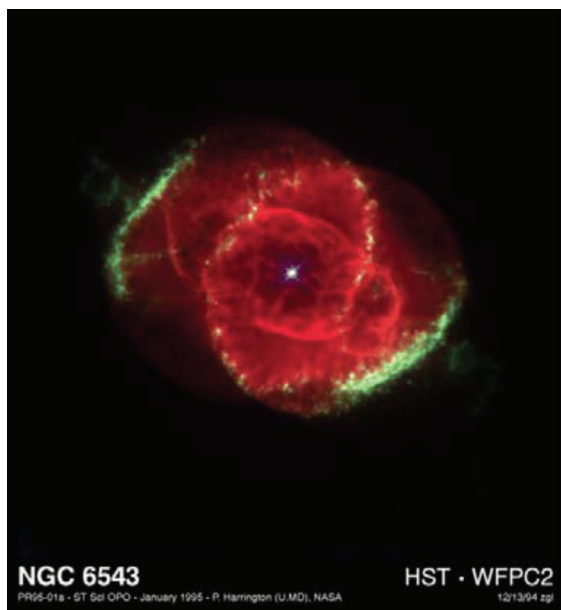
Com o fim da produção de energia no núcleo mais interno da estrela, suas propriedades se alteram, principalmente raio e temperatura superficial. A estrela então sai da sequência principal e passa pelas fases mais avançadas até chegar ao fim de sua vida. Em termos gerais, os estágios finais da evolução estelar podem ser tranquilos ou catastróficos, dependendo crucialmente da massa de que ela dispõe.

• Fim de vida de estrelas parecidas com o Sol

Com os processos de fusão nuclear, a composição do interior estelar muda gradualmente, diminuindo a abundância de hidrogênio e aumentando a de hélio. No centro da estrela (caroço estelar), onde a temperatura é mais alta, a quantidade de hélio aumenta mais rapidamente. No entanto, para ocorrer fusão nuclear são requeridas altas temperaturas que forneçam energia cinética suficiente para suplantarem a força de repulsão eletromagnética entre partículas de mesma carga elétrica positiva. Para que ocorra a fusão do H é necessária temperatura da ordem de 10^7 K. No caso do He (dois prótons no núcleo) a força de repulsão é maior ainda, por isso a fusão só ocorre se a temperatura superar 10^8 K.

À medida que diminui a disponibilidade de hidrogênio na região central, diminui também a produção de energia pelas reações termonucleares. Isso provoca queda de temperatura e pressão e

6. Pressão exercida sobre certa superfície devido à incidência de uma onda eletromagnética.



21- Dois exemplos de objetos nos estágios finais de vida de uma estrela como o Sol: a nebulosa planetária NGC6543 (esquerda) e a anã-branca Sirius B, ao lado de sua companheira maior Sirius A (direita) [hst/NASA/ESA].

leva à contração da região central. Essa contração provoca novo aquecimento que reativa o processo de fusão no núcleo. Isto provoca a formação de um envoltório ainda rico em hidrogênio que se funde para formar hélio. Com o esgotamento do hidrogênio no caroço central, este envoltório é a única fonte de produção de energia na estrela.

Uma vez iniciada a queima de hidrogênio na camada, a estrela se desloca no diagrama HR, tornando-se mais luminosa e mais fria. A queda de temperatura na superfície se deve à uma pequena expansão das regiões externas, o que aumenta a área da superfície. Esse aumento na área leva a um pequeno aumento na luminosidade total⁷.

Ao cessar totalmente a fusão nuclear na região central, a queda de temperatura promove uma contração rápida (colapso). Neste processo a energia potencial gravitacional é convertida em energia térmica, que serve para aumentar a camada envoltória onde se queima o hidrogênio.

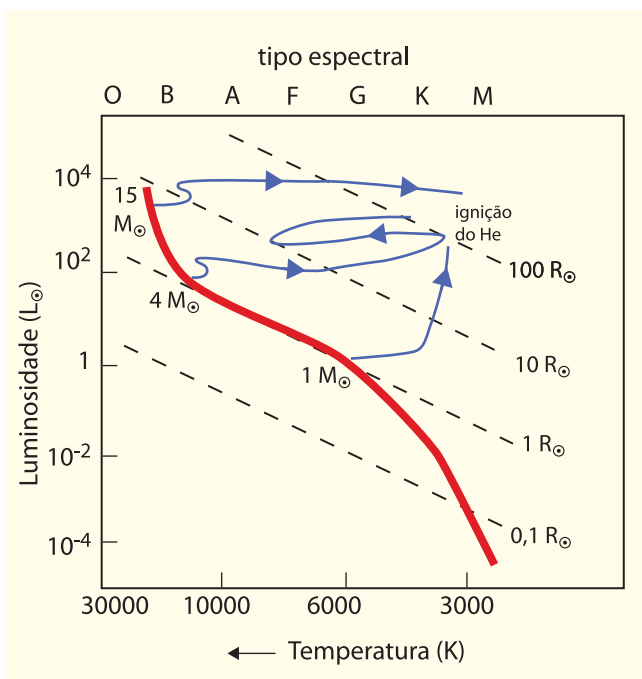
Sem a produção de energia, a pressão do gás no caroço mais interno diminui e a contração devida à gravidade comprime a estrela. Cerca de dez bilhões de anos depois que a estrela chegou à sequência principal, a diminuição do hidrogênio é substancial e o caroço formado essencialmente de hélio começa a se contrair.

O desequilíbrio de forças que atua no caroço estelar também se reflete pelo restante da região central da estrela. A rápida fusão de hidrogênio provoca aumento na pressão de radiação que impele as camadas mais externas a aumentar em raio, de forma que nem mesmo a gravidade pode se contrapor. Com a expansão, ocorre uma diminuição da temperatura superficial da estrela e ela começa a se transformar em gigante vermelha. Esse processo ocorre em um período comparativamente curto, de cem milhões de anos.

Se a temperatura interna for alta o suficiente, algumas dezenas de milhões de anos após a fusão do He, um novo caroço estelar composto principalmente por carbono é formado. Com o aumento na temperatura superficial, a luminosidade também cresce, e a estrela encontra-se agora na região das supergigantes vermelhas.

7. Pela equação 8 vemos que a luminosidade depende da temperatura e do raio da estrela. Se a temperatura cai, a luminosidade diminui, mas se o diâmetro aumenta a luminosidade cresce. O que ocorre, é que a expansão da estrela influencia mais na luminosidade que a queda de temperatura.

22- Trajetórias evolutivas de estrelas de diferentes massas. Ao contrário de estrelas semelhantes ao Sol, as estrelas de maior massa seguem caminhos horizontais no Diagrama H-R, indicando uma evolução sem mudanças abruptas. $M_{\odot}$ significa massa solar.



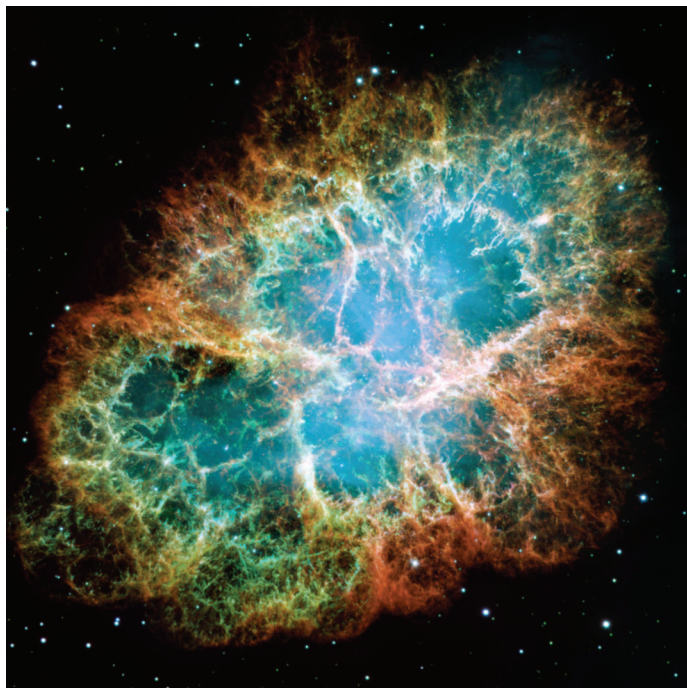
A temperatura do núcleo da supergigante vermelha é menor 6×10^8 K, portanto, insuficiente para continuar o processo de fusão nuclear e transformar o carbono em elementos mais pesados. Na ausência de contrapartida térmica para compensar a contração gravitacional, o núcleo estelar continua a se colapsar. Quando a densidade chega a aproximadamente $10^{10} \text{ kg m}^{-3}$, os elétrons ficam tão próximos que o gás não pode mais ser comprimido e a contração do núcleo é interrompida. A estrela fica instável e o gás de suas camadas mais externas é lentamente ejetado, de forma que o objeto fica dividido em duas componentes. Internamente, um núcleo central muito pequeno, quente e muito denso, onde ocorre a fusão de hélio. Externamente, uma componente de material ejetado, mais frio e difuso, que se localiza a certa distância do núcleo central. Esse objeto é uma nebulosa planetária (figura 21).

Com o tempo, a nebulosa planetária continua se expandindo, tornando-se cada vez mais difusa e fria. Esse material expelido enriquece o meio interestelar com hélio e carbono. A remanescente estelar no centro da nebulosa planetária é formada principalmente de carbono e continua ainda visível por algum tempo graças ao calor armazenado, mas com pouco brilho por ser reduzida. Essa estrela remanescente é muito quente e densa, tem o tamanho da Terra, mas cerca de metade da massa do Sol, e tem o nome de anã-branca.

• Fim de vida de estrelas massivas

Todas as estrelas saem da sequência principal quando o hidrogênio do caroço estelar se esgota. Inicialmente, seguem para a região das gigantes vermelhas do Diagrama H-R. Como mostra a figura 22, as trajetórias evolutivas dependem das massas das estrelas.

Em estrelas com massa superior a $8 M_{\odot}$ a temperatura interna chega a atingir os níveis necessários para a fusão do C em elementos mais pesados. O núcleo estelar evolui rapidamente. A estrela passa pelas várias etapas de fusão nuclear sem sofrer drásticas alterações, como é mostrado na trajetória da estrela de $15 M_{\odot}$ na figura 22. A cada período entre equilíbrio e instabilidade, a temperatura central aumenta, as reações nucleares se aceleram e a energia gerada sustenta a estrela contra um colapso. Mas a duração desses eventos é cada vez mais curta. Por exemplo, a duração aproximada de fusão para uma estrela de $20 M_{\odot}$ são os seguintes: o H em 10^7 anos, o He em 10^6 anos, o C em 10^3 anos, o O em um ano, o Si em uma semana e o núcleo de Fe em um único dia.



23- A Nebulosa do Caranguejo é o que restou da explosão de uma supernova observada a olho nu em 1054. Ela é formada por material ejetado das camadas da estrela massiva no fim de sua vida (http://www.nasa.gov/images/content/138785main_image_feature_460_ys_full.jpg).

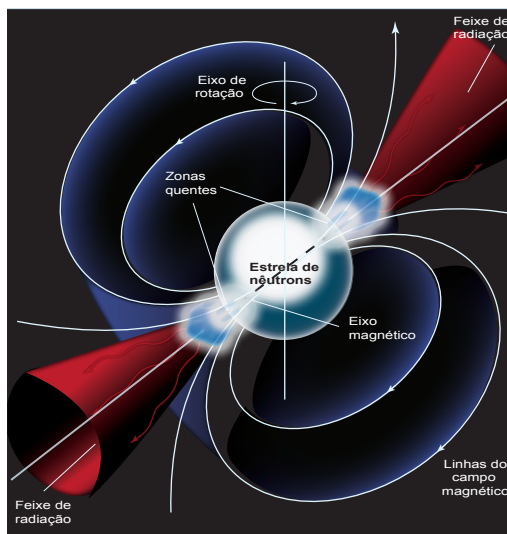
O átomo de ferro é tão compacto que sua fusão não libera energia. Ao contrário, absorve energia do ambiente. Com o fim definitivo da produção de energia na região mais central da estrela, mesmo esta a altas temperaturas a pressão não é suficiente para sustentar a enorme contração gravitacional provocando a implosão da estrela. Da mesma forma que uma bola ao ser jogada em alta velocidade contra um muro é comprimida e retorna em rebatida, o núcleo estelar de uma estrela massiva em colapso se expande violentamente em reação à compressão interrompida. Uma enorme onda de choque se expande através da estrela fazendo com que suas camadas externas se desloquem num evento explosivo, levando inclusive ferro do núcleo interno para o meio interestelar. Esse evento altamente energético é conhecido como explosão de supernova. Uma morte espetacular para as estrelas de altas massas, que pode destruir totalmente a estrela original, ou deixar apenas um objeto compacto em seu centro. Esse objeto compacto é composto basicamente de nêutrons, por isso recebe o nome de estrela de nêutrons. Seu tamanho é muito pequeno (cerca de 20 km) e sua densidade é da ordem de 10^{17} a $10^{18} \text{ kg m}^{-3}$. A separação entre os nêutrons é da ordem do tamanho do nêutron (um fentômetro = 10^{-15} m).

Uma das características básicas das estrelas de nêutrons é sua alta velocidade de rotação. Os períodos são frações de segundo. Outra característica é um poderoso campo magnético, cujos efeitos combinados com a rotação tornam possível a detecção e investigação desses objetos.

A primeira descoberta de uma estrela de nêutrons foi feita em 1967 pela então estudante Jocelyn Bell, que observou a emissão rádio de um objeto que pulsava em uma frequência muito precisa. O objeto recebeu o nome de pulsar. O modelo mais aceito atualmente descreve o pulsar como uma compacta estrela de nêutrons girando rapidamente, com o eixo de rotação e o feixe de radiação desalinhados, o que faz com que flashes de radiação decorrentes da elevada rotação sejam observados como um enorme farol cósmico, dependendo da inclinação do eixo de rotação delas em relação à Terra (figura 24). Esse estreito feixe de radiação bipolar é colimado pelas linhas de campo magnético.

Estrelas individuais de grande massa que explodem como supernovas e deixam como remanescentes estrelas de nêutrons produzem Supernovas Tipo II. Porém, o processo pode ocorrer também em sistemas binários, onde uma anã-branca recebe grande quantidade de matéria de sua companheira, uma estrela de grande massa. A anã-branca que já é bastante densa acaba explodindo como

24- Modelo para uma estrela de nêutrons e suas propriedades de pulsar. As partículas carregadas [especificar] são aceleradas e seguem as linhas de campo magnético. Um feixe de emissão rádio é liberado.



Massa Inicial ($M_{\odot}$)	Objeto Compacto	Massa Final
até $10 M_{\odot}$	Anã-Branca	Menor que $1,4 M_{\odot}$
10 a $25 M_{\odot}$	Estrela de Nêutrons	$1,4 M_{\odot}$
acima de $25 M_{\odot}$	Buraco Negro	5 a $13 M_{\odot}$
Massa ($M_{\odot}$)	Evolução	Final
até 0,08	não funde H	anã-marrom
0,08 a 0,5	funde H	anã-branca de He
0,5 a 10	funde H e He	anã-branca de C e O
11 a 100	funde H, He, C, Ne, O, Si	estrela de nêutrons ou buraco negro
acima de 100	criação de pares, SN	desintegração total ou buraco negro

Tabela 1: Resumo evolutivo de estrelas em função da massa (Astronomia e Astrofísica, <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node14.htm>).

supernova que se desintegra totalmente ou deixa como remanescente um objeto muito mais denso, um buraco negro. Neste caso a supernova é classificada como Tipo I.

No fim da vida de uma estrela de massa elevada, o que resta após a explosão de supernova é o núcleo estelar em contração contínua. Com a diminuição do raio, a gravidade pode atingir níveis tão elevados que nem mesmo a luz consegue escapar desse objeto, por isso ele recebe a denominação buraco negro. Uma das propriedades dos buracos negros é explicada pela teoria da relatividade: todo corpo massivo provoca curvatura no espaço a sua volta e tudo que se move nesse espaço segue trajetórias curvas. No caso do buraco negro, essa curvatura seria extrema, levando tudo que estiver no interior do horizonte de eventos, uma área crítica no seu entorno, a mergulhar dentro dele. Se a velocidade de escape chega a ser maior que a da luz (300.000 km/s) a região onde isso ocorre fica invisível. A abrangência do horizonte de eventos varia com a massa do buraco negro.

A morte de uma estrela massiva, na forma de explosão de supernova, além de enriquecer com elementos químicos o meio interestelar, pode desencadear, por ondas de choque de outras supernovas, os processos de formação estelar, permitindo o nascimento de mais estrelas.

CAPÍTULO 8

A Via Láctea

Walter Junqueira Maciel

8.1 INTRODUÇÃO: A VIA LÁCTEA

8.1.1 OBSERVAÇÕES DA VIA LÁCTEA

8.1.2 A ESTRUTURA DA VIA LÁCTEA

8.1.3 A VIA LÁCTEA NA HISTÓRIA

8.2 COMPONENTES DA VIA LÁCTEA

8.2.1 ESTRELAS E CAMPO DE RADIAÇÃO

8.2.2 NEBULOSAS

8.2.3 GÁS INTERESTELAR

8.2.4 POEIRA INTERESTELAR

8.2.5 RAIOS CÓSMICOS

8.2.6 CAMPO MAGNÉTICO

8.3 DISTÂNCIAS

8.3.1 PARALAXE TRIGONOMÉTRICA

8.3.2 MÉTODOS ESTATÍSTICOS E CINEMÁTICOS

8.3.3 DISTÂNCIAS ESPECTROSCÓPICAS

8.3.4 A RELAÇÃO PERÍODO-LUMINOSIDADE

8.4 O MEIO INTERESTELAR

8.4.1 INTRODUÇÃO

8.4.2 A DENSIDADE DO MEIO INTERESTELAR

8.4.3 O CAMPO DE RADIAÇÃO INTERESTELAR

8.4.4 LINHAS ESPECTRAIS INTERESTELARES

8.4.5 EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO

8.4.6 TEMPERATURA DO MEIO INTERESTELAR

8.4.7 NEBULOSAS IONIZADAS INTERESTELARES

8.4.8 ABUNDÂNCIAS INTERESTELARES

8.4.9 POEIRA INTERESTELAR

8.4.10 MOLÉCULAS INTERESTELARES

8.4.11 EQUILÍBRIO NO MEIO INTERESTELAR

8.5 CINEMÁTICA DA GALÁXIA

8.5.1 EQUAÇÕES DA ROTAÇÃO GALÁCTICA

8.5.2 ROTAÇÃO RÍGIDA E ROTAÇÃO KEPLERIANA

8.5.3 FÓRMULAS DE OORT

8.5.4 A CURVA DE ROTAÇÃO

8.6 ESTRUTURA GALÁCTICA E BRAÇOS ESPIRAIS

8.6.1 ONDAS DE DENSIDADE

8.7 POPULAÇÕES ESTELARES

8.7.1 O CONCEITO DE POPULAÇÕES ESTELARES

8.7.2 POPULAÇÕES ESTELARES E AS PRINCIPAIS

REGIÕES DA GALÁXIA

8.7.3 ABUNDÂNCIAS QUÍMICAS

8.8 FORMAÇÃO DE ESTRELAS

8.8.1 COLAPSO E FRAGMENTAÇÃO

8.8.2 O CRITÉRIO DE JEANS

8.9 FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DA GALÁXIA

8.9.1 EVOLUÇÃO GALÁCTICA E EVOLUÇÃO QUÍMICA



1- A Via Láctea e as Nuvens de Magalhães (Roger Smith, AURA/NOAO/NSF).

8.1 INTRODUÇÃO: A VIA LÁCTEA

8.1.1 OBSERVAÇÕES DA VIA LÁCTEA

Em noites de céu aberto pode-se observar uma faixa esbranquiçada estendendo-se pelo céu e contrastando fortemente com as regiões vizinhas. É o plano da galáxia que abriga o Sistema Solar, a Via Láctea (figura 1). Observando-se cuidadosamente na direção sul, é possível distinguir também duas manchas claras, sem forma definida, as Nuvens de Magalhães, galáxias satélites da Via Láctea.

Galáxias como a Via Láctea são gigantescos sistemas abrigando centenas de bilhões de estrelas e outros objetos, como planetas, nuvens de gás e poeira.

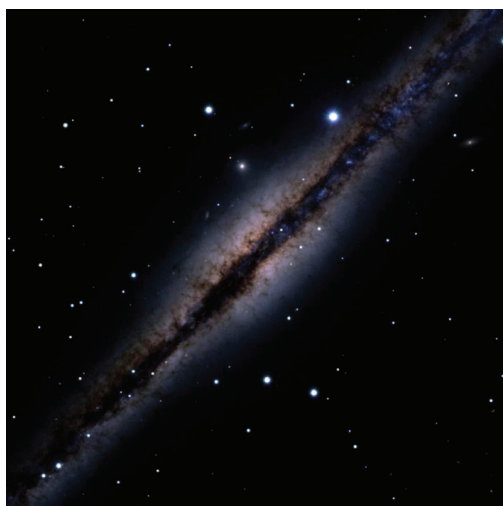
Muitas outras galáxias podem ser observadas, embora quase todas necessitem de um pequeno telescópio, ou ao menos um binóculo, para que possam ser claramente definidas. Para diferenciar a Via Láctea de outras galáxias, é costume grafar “Galáxia”, com um “G” maiúsculo. É possível observar milhões de galáxias no céu, com formas e tamanhos diferentes, sendo a Via Láctea apenas uma delas, e bastante comum. Isto é uma grande vantagem para o estudo da Via Láctea, pois sua forma, conteúdo, estrutura e evolução não devem ser muito diferentes das de outras galáxias. A principal dificuldade do estudo da Galáxia é que a Terra, como o Sistema Solar, é parte dela, o que torna difícil conhecer algumas de suas propriedades, por efeito de ausência de distanciamento crítico. Isso, teoricamente, ocorre também com o morador de uma cidade que teria dificuldade em definir o desenho das ruas, praças etc., sem sair do chão.

8.1.2 A ESTRUTURA DA VIA LÁCTEA

Observações detalhadas da Via Láctea mostram que ela tem forma de um disco achatado, com um núcleo brilhante, ou bojo, e um halo aproximadamente esférico, como mostrado na figura 2. O disco contém muitas estrelas, gás e poeira, enquanto no halo a quantidade de estrelas observadas é muito menor. No núcleo a densidade de estrelas é elevada, o que o torna especialmente brilhante. Essas



2- A Via Láctea (COBE/DIRBE/NASA).



3- A galáxia NGC 891 (Howk/Savage/Sharp).



4- A galáxia NGC 628 (Gemini).

características são também comuns a muitas outras galáxias, que exibem núcleos, discos e halos estelares. A figura 3 mostra a galáxia NGC 891, muito semelhante à Via Láctea.

O Sistema Solar está imerso no disco da Galáxia, isto é, nossa visão das demais partes dela está limitada pela localização da Terra, dentro do disco. Mas, comparando observações mais detalhadas de alguns objetos galácticos com imagens de outras galáxias, pode-se ter uma ideia de como a Galáxia seria, se pudéssemos observá-la do exterior. O resultado é semelhante ao mostrado na figura 4, que retrata a galáxia NGC 628. Esse objeto, como a Via Láctea, tem uma estrutura espiral na região do disco, com braços espirais associados a muitas estrelas jovens e brilhantes. A Via Láctea é então uma galáxia espiral, de acordo com o sistema de classificação de galáxias de Hubble, em que essas estruturas podem ser espirais, com ou sem barras, elípticas e irregulares.

Os astrônomos pensam que a Galáxia tenha uma barra próxima ao bojo. Nesse caso, uma classificação mais precisa para ela seria de espiral barrada. E ela não está isolada no Universo. Muitas galáxias pertencem a grupos chamados aglomerados de galáxias e a Via Láctea integra o chamado Grupo Local, que reúne entre 40 a 50 objetos, entre os quais as duas Nuvens de Magalhães e a galáxia de Andrômeda, outra espiral muito parecida com a Via Láctea.

Uma característica interessante que se pode observar na Galáxia é uma faixa escura ao longo do disco. Essa estrutura está presente em outras galáxias, como é o caso de NGC 891, na figura 3. Durante muito tempo, os astrônomos acreditavam que essas regiões escuras abrigavam um baixo

número de estrelas, verdadeiros “buracos” no céu. Apenas na década de 1930 ficou evidente que essas regiões exibem nuvens de poeira interestelar, que absorve a luz de estrelas situadas além, de modo que não é possível observá-las da Terra. A poeira é formada basicamente por pequenos grãos sólidos, mais ou menos como a areia das praias.

A ideia atual sobre estrutura da Galáxia envolve três regiões principais: o disco, o bojo e o halo. O disco pode ainda ser subdividido em duas partes, o disco fino, mais próximo ao plano galáctico, com espessura de centenas de parsecs – um parsec corresponde a aproximadamente a 3,26 anos-luz – e o disco espesso, que se estende a uma distância maior do plano, da ordem de mil parsecs.

O diâmetro total do disco é da ordem de 50 mil parsecs, e o halo esférico é provavelmente ainda maior. A Galáxia, assim como outras, parece conter parte considerável de matéria escura, isto é, matéria não luminosa, cuja natureza permanece desconhecida. O bojo da Galáxia é muito menor, com dimensões abaixo de três mil parsecs, aproximadamente.

8.1.3 A VIA LÁCTEA NA HISTÓRIA

O nome da Galáxia – Via Láctea – é utilizado em várias línguas modernas, e remonta à Antiguidade Clássica. Na mitologia grega, Zeus teve um filho, Héracles, com uma mortal, Alcmena, esposa de Anfitrião. Para que o menino tivesse poderes associados aos deuses, como a imortalidade, Zeus levou-o para ser amamentado por sua esposa Hera, que, zangada, afastou de si o menino, derramando seu leite pelo céu, o que originou a Via Láctea.

O homem sempre teve curiosidade em conhecer a origem e a estrutura da Via Láctea, e vários modelos sobre ela foram elaborados historicamente, como os de Thomas Wright (1750), William Herschel (1785) e Jacobus Cornelius Kapteyn (1922). Esses modelos tentavam reproduzir, a partir de contagens de estrelas, o aspecto achatado observado a olho nu, mas todos apresentaram dois defeitos fundamentais. No primeiro caso, as distâncias das estrelas não eram conhecidas e, no segundo, a absorção da luz das estrelas pela poeira interestelar não era levada em conta, o que afeta as conclusões sobre a distribuição estelar e a forma da Galáxia. Assim, o tamanho previsto da Galáxia foi sempre muito menor que o real, e o Sol esteve sempre colocado no centro, o que reproduziu um erro sistemático.



5- As Plêiades, um aglomerado galáctico (David Malin/AAO).

Essa dificuldade só foi resolvida no início do século 20, quando os modelos da Via Láctea foram comparados com a distribuição dos aglomerados globulares, conjuntos de estrelas reunindo centenas de milhares de objetos, com forma aproximadamente esférica. Os aglomerados têm distribuição homogênea em torno do centro da Galáxia, de modo que o centro de gravidade do sistema de aglomerados deveria coincidir aproximadamente com o centro da Galáxia. Como suas distâncias foram determinadas com precisão, ficou evidente que a Galáxia era muito maior que se pensava, e que o Sol não estava no centro do sistema, mas numa posição periférica.

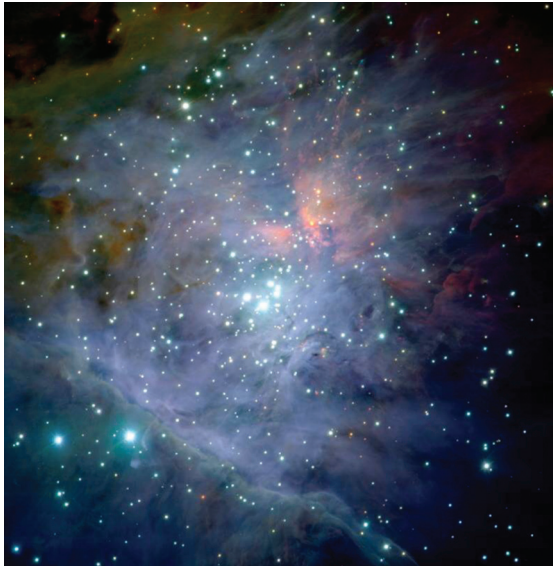
8.2 COMPONENTES DA VIA LÁCTEA

De modo geral, os principais componentes da Via Láctea são: estrelas, nebulosas, gás interestelar, poeira interestelar, raios cósmicos, e o campo magnético galáctico.

8.2.1 ESTRELAS E CAMPO DE RADIAÇÃO

As estrelas são, provavelmente, o principal componente da Via Láctea, contendo a maior parte de sua massa visível. As estrelas podem ser de campo, ou de aglomerados. No segundo caso, os aglomerados podem ser do tipo globular, ou galácticos, quando o número de estrelas é menor e sua associação gravitacional menos intensa. As Plêiades, um conjunto de estrelas visíveis a olho nu na Constelação do Touro, são um bom exemplo de aglomerado galáctico (figura 5).

Associado às estrelas está um campo de radiação, composto por fótons que elas emitem, e existem fótons produzidos por outros processos físicos. Para investigar as propriedades dos componentes da Galáxia, em particular dos objetos do disco, é necessário conhecer detalhadamente esse campo. Sua determinação é complexa, envolvendo medidas em faixas muito diferentes do espectro eletromagnético: desde a radiação de baixa energia observada em ondas de rádio até os raios X e gama, de alta energia. A origem desses fótons pode estar tanto no interior como no exterior da Galáxia.



6- A Nebulosa de Orion (Mark McCaughrean/VLT/ANTU/ESO).



7- A nebulosa planetária NGC7293 (AAO).

8.2.2 NEBULOSAS

As nebulosas da Galáxia são essencialmente nuvens de gás e poeira, geralmente associadas a estrelas. Na constelação de Órion, por exemplo, próximo às Três Marias, é possível observar, a olho nu ou com ajuda de um pequeno binóculo, a Nebulosa de Órion (figura 6). À vista desarmada, ela parece uma pequena mancha branca, mas imagens mais profundas revelam uma estrutura extremamente complexa, contendo gás, poeira e estrelas jovens e brilhantes. Nebulosas como essa são chamadas difusas, ou regiões HII, isto é, regiões em que o hidrogênio está ionizado, ou seja, eletricamente carregado.

Um átomo de hidrogênio contém um próton e um elétron. As estrelas brilhantes associadas às nebulosas difusas são muito quentes e seus fótons podem arrancar o elétron do hidrogênio, que fica então ionizado. Essas nebulosas quase sempre exibem regiões escuras, associadas a poeira interestelar, além de regiões com forte presença de moléculas, como o monóxido de carbono, CO. Esses objetos são regiões de formação estelar, o que significa que as estrelas ali presentes são comparativamente muito jovens, com idades da ordem de milhões de anos. Para uma analogia, a idade do Sol é de aproximadamente 4,5 bilhões de anos, o que significa que o Sol é bem mais velho que as nebulosas difusas.

Outro tipo de nebulosa presente na Galáxia são as planetárias, como NGC 7293, mostrada na figura 7. Essas estruturas também estão associadas a estrelas muito quentes, mas suas dimensões são muito menores que nas regiões HII. Além disso, sua natureza é radicalmente diferente: enquanto as nebulosas difusas são sempre jovens, associadas a estrelas igualmente jovens e brilhantes, as planetárias são estruturas que resultaram da ejeção de estrelas envelhecidas, próximas ao estágio final de suas vidas. Em relação ao nome que recebem, é preciso dizer que, de fato, não têm qualquer relação com planetas. Apenas lembram a forma de planetas como Netuno, observadas com um telescópio de pequeno porte.

Além das nebulosas difusas e planetárias, existe um terceiro tipo de nebulosas ionizadas: restos, ou remanescentes de supernovas, como a Nebulosa do Caranguejo, mostrada na figura 8. Como o nome delas sugere, essas nebulosas são o que sobrou de estrelas de grande massa, acima de oito vezes a massa do Sol, que explodiram como supernovas. Neste aspecto, elas se diferenciam das planetárias, que são ejetadas por estrelas de massa pequena, abaixo de oito massas solares. Em alguns bilhões de



8- A Nebulosa do Caranguejo, um resto de supernova (FORS/VLT/ESO).

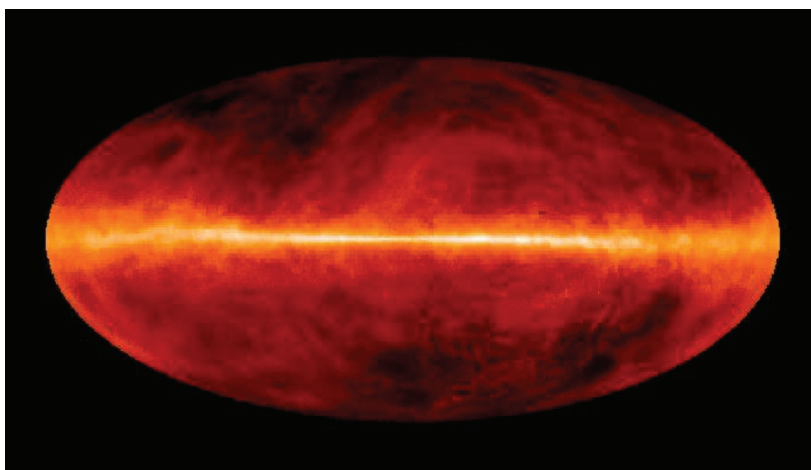
anos o Sol terminará a etapa de estabilidade em que se encontra, e ejetará suas camadas mais externas, que tomarão a forma de uma nebulosa planetária.

Quando o gás e a poeira estão associados com estrelas quentes no interior de uma nebulosa, mas não o suficiente para ionizar o hidrogênio, forma-se uma nebulosa de reflexão. As Plêiades, vistas na figura 5, mais uma vez são exemplo disso. Elas receberam esse nome porque os grãos presentes na nebulosa refletem a luz das estrelas próximas, o que é confirmado pela comparação entre os espectros da nebulosa e da estrela.

8.2.3 GÁS INTERESTELAR

O gás interestelar ocupa todo o espaço do disco da Galáxia e de outras galáxias espirais e isso também é comum em galáxias irregulares, com a diferença que, no segundo caso, sua detecção é mais difícil. Ele pode ser identificado pela absorção que provoca na luz de estrelas situadas em sua direção, ou pela emissão de radiação em alguns comprimentos de onda bem definidos. De acordo com as leis de Kirchhoff (Gustav Kirchhoff, 1824-1887, físico alemão), nuvens frias situadas à frente de estrelas quentes produzem uma absorção, que pode ser detectada. Da mesma forma, se não houver qualquer estrela na direção da nuvem, ela poderá ser vista por sua emissão, em condições favoráveis. Mas ambas as situações podem ocorrer, de modo que o gás pode ser detectado e sua natureza pode ser esclarecida. Basicamente esse gás é composto de hidrogênio e hélio, com pequena, mas importante, contribuição de elementos mais pesados, como carbono, nitrogênio, oxigênio e outros.

As primeiras detecções de linhas espectrais interestelares ocorreram no início do século 20, mas devido às limitações instrumentais, apenas alguns elementos pouco abundantes puderam ser identificados. Os elementos mais importantes, em particular o hidrogênio atômico, ou HI, só foram medidos de maneira precisa na segunda metade do século, com técnicas de observação nas faixas do infravermelho, milimétrica e rádio, do espectro eletromagnético. Alguns resultados recentes da emissão do hidrogênio ao longo do plano galáctico estão mostrados na figura 9. Eles são obtidos a partir da chamada linha de 21cm do hidrogênio, um comprimento de onda de rádio.



9- Emissão de H no plano galáctico (J. Dickey/UMn/F. Lockman/NRAO).

8.2.4 POEIRA INTERESTELAR

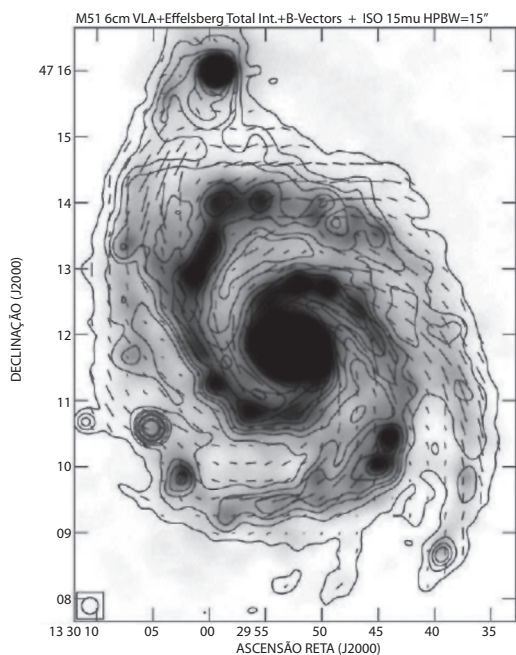
A poeira interestelar ocorre em nuvens escuras, e é formada por grãos sólidos, com dimensões típicas de poucas dezenas de angstroms, até microns, ou milésimos de milímetros. O efeito mais óbvio dos grãos é a extinção interestelar, isto é, a absorção da radiação das estrelas situadas na direção da nuvem de poeira, mas localizadas além dela. A extinção tem um efeito importante na medida do brilho intrínseco das estrelas e nas contagens estelares que permitem descrever a estrutura da Galáxia. Em contrapartida, possibilitam entender a natureza dos grãos, suas dimensões, composição química e propriedades ópticas. Além da extinção, o estudo dos grãos pode ser feito a partir de medidas da polarização interestelar e emissão de energia.

8.2.5 RAIOS CÓSMICOS

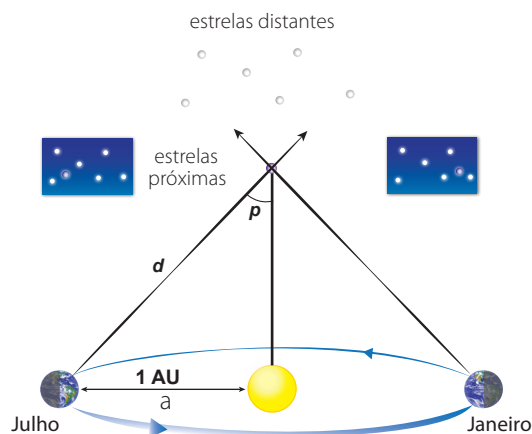
Raios cósmicos são partículas de alta energia que atravessam o espaço interestelar, eventualmente aproximando-se da atmosfera da Terra. São compostos por prótons, elétrons, núcleos de hélio e outros elementos, gerados em eventos energéticos na Galáxia ou em regiões extragalácticas, incluindo as explosões solares, supernovas, núcleos ativos de galáxias etc. Independente de sua origem, ao atravessar o disco da Galáxia, eles podem interagir com os átomos do gás nesta região, o que afeta suas propriedades físicas. O processo físico conhecido como espalação, por exemplo, resulta da interação dos raios cósmicos de baixa massa com átomos pesados do meio interestelar, produzindo os elementos Li, Be e B. O processo inverso também pode ocorrer quando raios cósmicos de massa mais elevada interagem com átomos leves do meio interestelar, caso do H, produzindo os mesmos elementos. Esse processo é importante para o estudo da nucleossíntese desses elementos leves, facilmente destruídos durante a evolução estelar, de modo que sua principal fonte de produção é justamente o processo da espalação.

8.2.6 CAMPO MAGNÉTICO

A Galáxia também exibe um campo magnético de baixa intensidade, da ordem de alguns microgauss, associado principalmente ao disco e aos braços espirais. A origem desse campo ainda é debatida, assim



10- O campo magnético de M51 (R. Beck).



11- Paralaxe trigonométrica.

como sua influência na formação e equilíbrio das nuvens interestelares. A distribuição do campo na Galáxia pode ser analisada pelo estudo da polarização de grãos interestelares, além de outros métodos como o Efeito Zeeman, que permitem determinar sua intensidade. Atualmente, existem pesquisas detalhadas em galáxias externas, capazes de mapear os campos magnéticos nesses objetos, como pode ser visto na figura 10 para a galáxia M51. Esses resultados potencialmente podem ser aplicados à Galáxia.

8.3 DISTÂNCIAS

Um dos problemas básicos no estudo da Galáxia é a determinação de distâncias. De fato, existe basicamente um único método direto para resolver esse problema: a paralaxe trigonométrica que se aplica atualmente a um número restrito de objetos relativamente próximos. Para os demais, métodos indiretos devem ser utilizados, quase sempre acompanhados de grandes incertezas.

8.3.1 PARALAXE TRIGONOMÉTRICA

Este método consiste essencialmente em observar uma estrela com um intervalo de tempo de seis meses, de modo que a Terra tenha se deslocado por uma distância de duas unidades astronômicas, sendo a unidade astronômica definida pela distância média entre a Terra e o Sol, equivalente a 150 milhões de quilômetros.

Como indicado na figura 11, a distância da estrela é dada pela relação $d = 1/p$, sendo a distância medida em parsecs (pc) e a paralaxe p em segundos de arco. Essa relação pode ser considerada como a definição do parsec, a unidade de distância mais utilizada na astrofísica da Galáxia, além de seus múltiplos, o kiloparsec (kpc), sendo $\text{kpc} = 1.000 \text{ pc}$, e o megaparsec (Mpc), $\text{Mpc} = 1.000 \text{ kpc}$. Considerando outra unidade usual de distância, o ano-luz, a distância que luz viaja no vácuo em um ano, temos $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ anos-luz}$.

Atualmente, as medidas mais precisas de paralaxes trigonométricas são as do satélite Hipparcos, lançado em 1989, que consegue medir paralaxes acima de 0,001 segundo de arco, ou seja, pode ser aplicado a estrelas com distâncias abaixo de 1.000 pc, o que o torna aplicável a cerca de 120 mil

estrelas. Está em desenvolvimento o projeto GAIA, a ser lançado provavelmente em fins de 2011, que deverá ser capaz de alcançar paralaxes cem vezes menores, até 0,00001 segundo de arco, o que corresponde a distâncias de 100 kpc, da ordem de grandeza das dimensões da própria Galáxia.

8.3.2 MÉTODOS ESTATÍSTICOS E CINEMÁTICOS

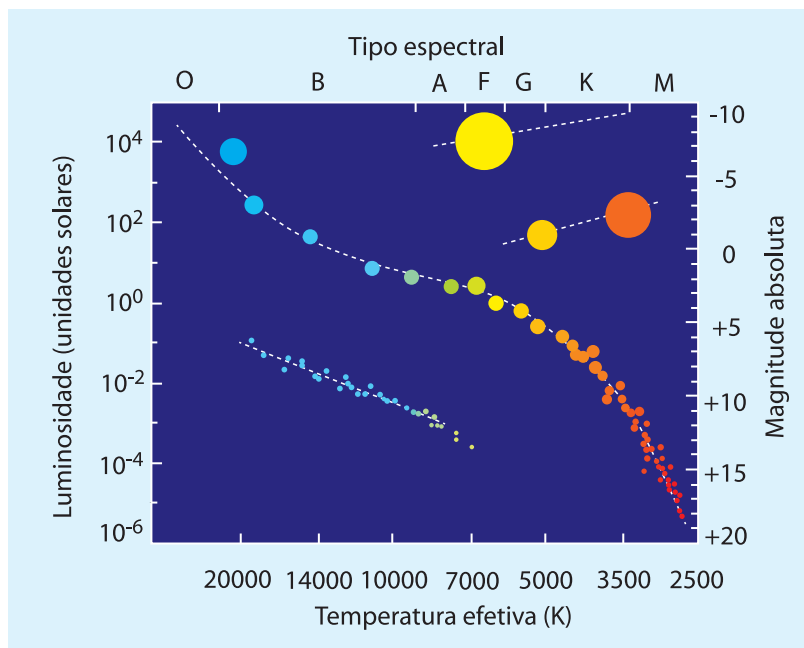
Alguns métodos de determinação de distâncias baseiam-se em propriedades cinemáticas, isto é, em seus movimentos observados na linha de visada e no plano do céu. De modo geral, pode-se dividir a velocidade de uma estrela em duas componentes: a radial, medida na linha de visada, e a tangencial, na direção perpendicular à linha de visada. A primeira pode ser medida com enorme precisão por meio do efeito Doppler, mas a velocidade tangencial tem geralmente uma aplicação mais limitada, devido à dificuldade em determinar movimentos ao longo do plano do céu.

Medidas de velocidades são sempre relativas, isto é, feitas em relação a um determinado sistema de referência. Procedimentos com telescópios no solo produzem velocidades relativas à Terra, ou geocêntricas. Uma vez que os movimentos da Terra em relação ao Sol são bem conhecidos, é possível, com relativa facilidade, reduzir essas velocidades a parâmetros heliocêntricos, ou seja, relativas ao Sol. O Sol e os objetos da vizinhança solar têm movimento de rotação em torno do centro da Galáxia. Uma média desses movimentos permite definir um sistema de referência mais geral, chamado Padrão Local de Repouso, ou LSR. Assim, é possível converter as velocidades observadas, inclusive a velocidade do Sol, a esse sistema, mais conveniente para investigar os movimentos na Galáxia.

Podemos definir alguns métodos de determinação de distâncias a partir de medidas de velocidades de grupos de estrelas, como, por exemplo, as paralaxes estatísticas, as paralaxes seculares e o método dos aglomerados móveis. Esses métodos baseiam-se em medidas das velocidades de grupos de estrelas, e não de estrelas individuais, permitindo assim a determinação de distâncias médias, ao contrário das paralaxes trigonométricas, que fornecem determinações individuais, mais precisas.

8.3.3 DISTÂNCIAS ESPECTROSCÓPICAS

É possível, ainda, desenvolver uma série de procedimentos para a determinação de distâncias, to-



12- Exemplo do diagrama HR calibrado.

dos eles relacionados às características espectrais observadas das estrelas. O sistema de classificação espectral, baseado no sistema originalmente desenvolvido em Harvard, permite associar um tipo espectral a cada estrela, variando dos tipos iniciais O, B, até os tipos finais K, M. Esses tipos estão ligados à sequência de temperaturas efetivas ou aos índices de cor das estrelas, como os índices B-V e U-B. Portanto, obtido o espectro de uma estrela, pode-se em princípio determinar sua temperatura efetiva, ligada à luminosidade estelar, ao raio e ao fluxo emitido pela estrela. Além do tipo espectral é necessário conhecer a classe de luminosidade da estrela, isto é, determinar se ela pertence à sequência principal, se é uma gigante, supergigante etc., o que pode ser feito, por exemplo, a partir de sua gravidade, obtida também de seu espectro.

Como um exemplo ilustrativo, a partir do espectro observado pode-se obter a temperatura efetiva, ou o tipo espectral, ou o índice de cor. Uma vez que esteja disponível um diagrama HR calibrado, como o mostrado na figura 12, a magnitude absoluta da estrela M pode ser conhecida. A magnitude aparente " m " é então medida, e a distância determinada a partir da definição do módulo de distância

$$m_V - M_V = 5 \log d - 5 \quad (1)$$

Um complicador desse método é a absorção interestelar, pois estrelas mais distantes ou em regiões fortemente obscurecidas são afetadas pela extinção. Nesse caso, é preciso incluir um termo adicional, no segundo membro da equação, que mede a extinção em magnitudes, e que deve ser determinado de forma independente.

8.3.4 A RELAÇÃO PERÍODO-LUMINOSIDADE

Um método eficiente para estabelecer distâncias galácticas e extragalácticas está baseado na relação entre o período e a luminosidade de algumas estrelas variáveis, em particular as Cefeidas. Essas estrelas apresentam variações regulares de brilho, causadas por uma variação em seus raios, chamada pulsação. A partir do trabalho desenvolvido no início do século 20 por Henrietta Leavitt, sabe-se que os períodos das curvas de luz aumentam para as estrelas mais brilhantes, o que evidencia a relação

período-luminosidade. Portanto, a aplicação desse método é, em princípio, simples: basta medir o período de variação luminosa da estrela, que geralmente pode ser feito com precisão, para obter a luminosidade, ou magnitude absoluta, usando a relação período-luminosidade. A distância pode então ser determinada a partir da equação (1) acima, como no caso anterior.

8.4 O MEIO INTERESTELAR

8.4.1 INTRODUÇÃO

O meio interestelar é uma das principais componentes da Galáxia. Tem papel fundamental na formação das estrelas, o que ocorre em nuvens interestelares, e na evolução química da Galáxia, pois o material reciclado nas estrelas pelas reações termonucleares é devolvido ao meio interestelar, onde é usado na formação de novas estrelas. Do ponto de vista da astrofísica da Galáxia, o meio interestelar é basicamente a região situada entre as estrelas, concentrado no disco galáctico, e disperso em nuvens interestelares. As dimensões totais do espaço interestelar são, portanto, da ordem das dimensões do disco, grosseiramente algo como 25 kpc de raio e cerca de algumas centenas de parsecs de altura. Nessa região estão concentradas as estrelas jovens e quentes, formadas a partir desse meio, e também, boa parte das estrelas mais velhas, que devolvem material processado ao meio interestelar.

A composição do meio interestelar é extremamente variada, mas pode ser simplificada considerando que contém essencialmente gás e poeira. Entretanto, muitos objetos podem ser incluídos a partir dessa definição, como as nebulosas escuras, nebulosas de reflexão, nebulosas difusas (regiões HII), nebulosas planetárias, restos de supernovas, nuvens moleculares, nuvens de H neutro e meio internuvens, além da presença de um campo magnético, do gás coronal e dos raios cósmicos.

8.4.2 A DENSIDADE DO MEIO INTERESTELAR

Uma maneira prática de caracterizar o meio interestelar pode ser a partir de suas densidades, provavelmente a característica mais marcante dessas regiões. A tabela 1 mostra alguns objetos astronômicos

Região	$n \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
Interior solar	7×10^{26}
Água	3×10^{22}
Ar	2×10^{19}
Fotosfera solar	1×10^{17}
Atmosfera (M5 III)	2×10^{15}
Envelope circunstelar (M)	1×10^8
Região IS densa	1×10^4
Região IS difusa	10
Meio internuvem	0,1
Gás coronal/MIG	10^{-4}

Tabela 1- Densidades em objetos astronômicos

e as suas densidades volumétricas típicas, em unidades de partículas cm^{-3} . As regiões interestelares podem ser grosseiramente divididas em regiões interestelares densas e difusas e, em ambos os casos, as densidades são muito mais baixas em comparação com outros objetos astronômicos, como pode ser visto na tabela. Essas regiões estão imersas em um meio internuvens, ainda mais diluído, possível de ser comparado qualitativamente ao ar que respiramos, espalhado entre as nuvens no céu. As baixas densidades do meio interestelar podem suscitar dúvidas com relação a sua importância, pois esse ambiente é geralmente menos denso que o melhor dos vácuos produzidos em laboratório. Ocorre que o meio interestelar está espalhado por distâncias muito grandes, de modo que o número de partículas observadas em uma coluna com um centímetro quadrado de área é elevado. Esse número é a chamada densidade de coluna, e pode alcançar valores da ordem de 10^{22} partículas cm^{-2} .

8.4.3 O CAMPO DE RADIAÇÃO INTERESTELAR

As estrelas quentes e jovens situadas no disco da Galáxia exibem um campo de radiação capaz de ser investigado a partir da análise da radiação emitida por elas. O campo de radiação interestelar total é muito mais complexo como se constatou recentemente com o desenvolvimento de detectores em outras faixas espectrais além da radiação visível. O espectro observado tem diversas componentes, como a radiação integrada em rádio, produzida por fontes galácticas e extragalácticas; a radiação de fundo cósmica, eco do Big Bang; a emissão infravermelha devida à poeira interestelar; a radiação estelar integrada, em comprimentos de onda na faixa ultravioleta; e a radiação de alta energia em raios X e gama, também emitida por fontes galácticas e extragalácticas.

A componente estelar no ultravioleta tem importância especial para a física do meio interestelar, em particular pela presença de um corte abaixo de $912 \text{ \AA}$, que corresponde aos fótons capazes de ionizar o hidrogênio. Para comprimentos de onda abaixo de $912 \text{ \AA}$, os fótons são absorvidos nas vizinhanças das fontes, dada a grande abundância do H, principal componente das nuvens interestelares. De fato, uma boa maneira de classificar essas nuvens pode ser a partir do estado de ionização do H: quase sempre, nas nuvens difusas o hidrogênio está na forma atômica (H); nas nuvens densas, ou nuvens moleculares, tem a forma molecular (H_2), e nas nuvens mais quentes, com temperaturas da ordem de 10 mil graus kelvin, o hidrogênio está ionizado (H^+ ou HII), como ocorre nas regiões HII e nebulosas planetárias.

8.4.4 LINHAS ESPECTRAIS INTERESTELARES

Muitas informações importantes podem ser obtidas a partir da análise de linhas de emissão e absorção interestelares. As linhas espectrais são o resultado dos processos de emissão e absorção da radiação pelos átomos e íons de diferentes elementos, correspondentes a transições entre dois níveis de energia. A frequência da linha pode ser determinada a partir da diferença das energias dos níveis, isto é, $E = h \nu = h c / \lambda$, onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vácuo, ν é a frequência da linha e λ o comprimento de onda. Na prática, os níveis de energia não são infinitamente finos, havendo um alargamento da linha, que dá a ela a aparência observada. Como processos de alargamento, pode-se citar o alargamento natural, consequência direta do princípio da incerteza, o alargamento Doppler, o alargamento por pressão etc. Em cada um desses casos, é possível definir um perfil para a linha, uma função que caracteriza a variação da absorção (ou emissão) dentro da linha.

Entre as linhas interestelares, a linha de 21 cm do hidrogênio é especialmente importante para o estudo da Galáxia. Essa linha é produzida por uma transição entre dois níveis de estrutura fina do estado fundamental do hidrogênio. A diferença de energia entre os níveis é muito pequena, e a transição ocorre em comprimentos de onda de rádio, correspondendo a $\nu = 1420 \text{ MHz}$ ou $\lambda = 21,1 \text{ cm}$. A probabilidade de essa linha ser produzida é muito pequena. Ela só é observada no meio interestelar porque a densidade de átomos de hidrogênio é extremamente alta. Analisando a emissão do H em diferentes posições na Galáxia é possível obter a densidade dos átomos que a produzem, isto é, pode-se estimar a densidade das nuvens interestelares. Essas medidas são particularmente importantes para o mapeamento do hidrogênio nos braços espirais da Galáxia.

Outra linha intensa que permite determinar as densidades no meio interestelar é a linha Lyman- α , correspondente à transição entre os dois primeiros níveis de energia desse átomo. Neste caso, $\lambda = 1215,67 \text{ \AA}$ e a linha pode ser observada na faixa ultravioleta do espectro eletromagnético. Os resultados indicam valores da mesma ordem daqueles já mencionados, com densidades volumétricas tipicamente de 0,1 a 10 partículas cm^{-3} . Muitas outras linhas interestelares podem ser observadas, de vários elementos químicos, em particular na região do ultravioleta.

8.4.5 EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO

Uma das principais características do meio interestelar é a ausência de equilíbrio termodinâmico (ET). Os principais processos físicos não podem geralmente ser simplificados pelo uso das equações de Boltzmann e Saha, da função de distribuição de Maxwell e da função de Planck, válidas para o ET. Essas equações são muito simples, e dependem de um único parâmetro: a temperatura. Portanto, no meio interestelar todos os processos físicos importantes de excitação e ionização devem ser considerados, sejam eles processos radiativos, em que a transição ocorre pela absorção ou emissão de um fóton, ou colisionais, quando a transição está associada a uma colisão entre o átomo considerado e outra partícula, geralmente um elétron. Esse fato faz com que a física das regiões interestelares seja consideravelmente mais complexa que nas regiões onde prevalece o equilíbrio termodinâmico.

8.4.6 TEMPERATURA DO MEIO INTERESTELAR

A temperatura das nuvens interestelares pode ser obtida pela análise de linhas espectrais ou, teoricamente, pela consideração dos processos de aquecimento e resfriamento que ocorrem no meio interestelar. Entre os primeiros temos a fotoionização de átomos neutros, o aquecimento pelos raios cósmicos e por fotoelétrons emitidos por grãos; entre os processos de resfriamento, pode-se citar a excitação colisional por elétrons ou outras partículas, como átomos ou moléculas de hidrogênio. Uma vez identificado cada processo, é preciso calcular as taxas de aquecimento e resfriamento. Se o sistema estiver em estado estacionário, após certo tempo, que pode ser determinado, a temperatura ficará estabelecida em certo valor de equilíbrio determinável a partir da condição de que as taxas sejam iguais. Valores tipicamente da ordem de 100 K são obtidos para as nuvens interestelares neutras, e da ordem de 10.000 K para as regiões ionizadas. O meio internuvens, mais quente e rarefeito, pode ter temperaturas ainda mais altas.

8.4.7 NEBULOSAS IONIZADAS INTERESTELARES

As nebulosas ionizadas interestelares incluem as nebulosas fotoionizadas – regiões HII e nebulosas

	Regiões H II	Nebulosas planetárias
Tipo espectral	O, B	O, W
Temperatura efetiva	30.000 - 50.000 K	30.000 - 300.000 K
População	I jovem	I velha – II
Temperatura eletrônica	10^4 K	10^4 K
Densidade eletrônica	$10 - 10^2 \text{ cm}^{-3}$	$10^2 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$
Massa total	$10^2 - 10^4 M_{\odot}$	$0,01 - 1 M_{\odot}$
Dimensão típica	10 pc	$\lesssim 0,5$ pc
Estado do H	H^+	H^+
Estado do He	He^+	$\text{He}^+, \text{He}^{++}$
Elementos pesados	ionizados	ionizados
Velocidade típica	10 km/s (térmica)	25 km/s (expansão)

Tabela 2- Propriedades das nebulosas fotoionizadas.

planetárias – e as nebulosas ionizadas colisionalmente, os restos de supernovas. Já mencionamos alguns exemplos desses objetos. As principais propriedades das nebulosas fotoionizadas estão relacionadas na tabela 2.

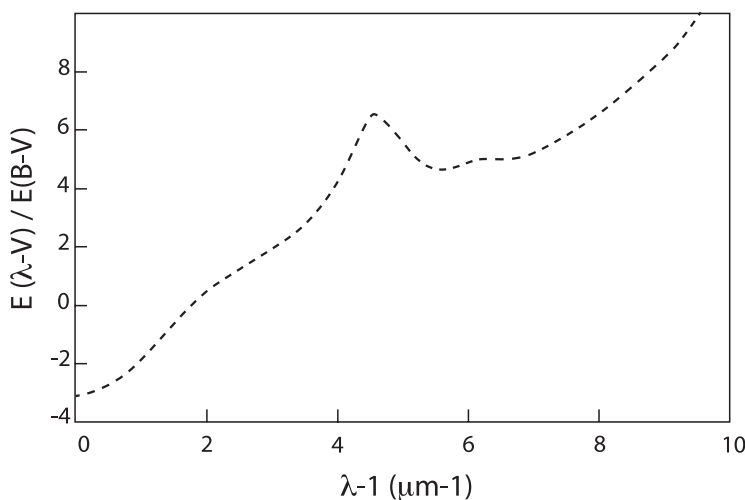
Uma característica interessante das nebulosas fotoionizadas é que a interface entre a região ionizada e o meio interestelar geral é muito estreita, menor que o tamanho típico dessas regiões. Isto se deve ao fato de que a distância percorrida por um fóton ionizante é pequena, isto é, a densidade de átomos de H é alta o suficiente para que o fóton seja absorvido rapidamente. Dessa forma, a região ionizada é relativamente bem definida, com as dimensões indicadas na tabela 2. No caso simples de uma única estrela e uma nuvem homogênea, a região ionizada é esférica, caracterizada por seu raio, o raio de Strömgren, assim chamado em homenagem à análise pioneira feita em 1939, pelo astrônomo sueco Bengt Strömgren (1908-1987). Uma consequência disso é que o grau de ionização da nebulosa, ou seja, a fração de átomos ionizados, é essencialmente igual a um em toda a nebulosa, caindo rapidamente a zero nas bordas da região, onde está a interface com o meio interestelar neutro.

8.4.8 ABUNDÂNCIAS INTERESTELARES

Determinadas as condições físicas das nebulosas fotoionizadas, essencialmente sua temperatura eletrônica e densidade eletrônica, pode-se obter sua composição química com precisão relativamente alta, pois essas nebulosas apresentam linhas de emissão brilhantes de muitos elementos como H, He, C, N, Ne, Ar, S etc. Esses resultados são muito interessantes para o estudo da evolução química da Galáxia, já que, em geral, é difícil obter abundâncias precisas desses elementos nas estrelas. Assim, os resultados das nebulosas fotoionizadas e das estrelas podem ser combinados, produzindo vínculos mais significativos para os modelos de evolução galáctica.

8.4.9 POEIRA INTERESTELAR

A poeira interestelar tem pelo menos três efeitos importantes e observáveis: a extinção interestelar, a polarização interestelar e a emissão de energia na faixa infravermelha do espectro. A extinção interes-



13- A curva de extinção interestelar.

telar introduz uma modificação na relação entre as magnitudes aparente e absoluta de uma estrela, e essa equação deve ser escrita na forma

$$m_V - M_V = 5 \log d - 5 + A_V \quad (2)$$

onde A é a absorção em magnitudes. Assim, se a extinção for alta, da ordem de alguns décimos de magnitude, o cálculo das distâncias será bastante afetado. Sem considerar a extinção interestelar, as distâncias das estrelas parecem maiores que são na realidade. Além disso, a extinção afeta mais os comprimentos de onda mais curtos, de modo que as estrelas parecem mais avermelhadas que são.

A principal informação sobre a extinção interestelar está contida na curva de extinção, como se vê na figura 13. Por essa curva observa-se que a extinção é muito baixa em grandes comprimentos de onda – infravermelho e rádio – e alta em comprimentos curtos, especialmente no ultravioleta. Isso dá uma ideia preliminar do tamanho dos grãos responsáveis pela extinção, da ordem de centenas a milhares de angstroms. Comparando a curva de extinção com os resultados previstos para diferentes composições químicas, pode-se ter uma ideia da composição química dos grãos. Os principais candidatos são grãos de grafite, silicatos, SiC, gelos sujos (com impurezas) e, também, partículas chamadas PAH, ou hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.

Grãos não isotrópicos, como estruturas alongadas ou com impurezas, podem polarizar a luz, se devidamente alinhados. Os grãos interestelares geralmente têm alguma carga elétrica, sofrendo a ação de campos magnéticos como o campo interestelar. Como resultado disso, a luz refletida pelos grãos pode estar parcialmente polarizada, e o estudo desse efeito dá informações sobre a natureza das partículas.

Além disso, os grãos emitem radiação, em especial na faixa infravermelha do espectro eletromagnético. Sua emissão é essencialmente de corpo negro, de modo que observando essa radiação, pode-se estimar suas temperaturas. Os valores obtidos são baixos, menores que 100 K.

A análise da formação e evolução dos grãos ainda está em estágio rudimentar, mas acredita-se que eles sejam formados principalmente nas atmosferas e envoltórias de estrelas frias, e, posteriormente, ejetados para as nuvens interestelares.

Região	$n \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$T \text{ (K)}$	$P \text{ (din a/cm}^2\text{)}$
nuvens difusas	10	100	10^{-13}
nuvens moleculares densas	10^4	< 100	10^{-11}
meio internuvens	10^{-1}	10^4	10^{-13}
regiões de H ionizado	10^2	10^4	10^{-10}
gás coronal	10^{-2}	10^5	10^{-13}

Tabela 3- Equilíbrio no meio interestelar.

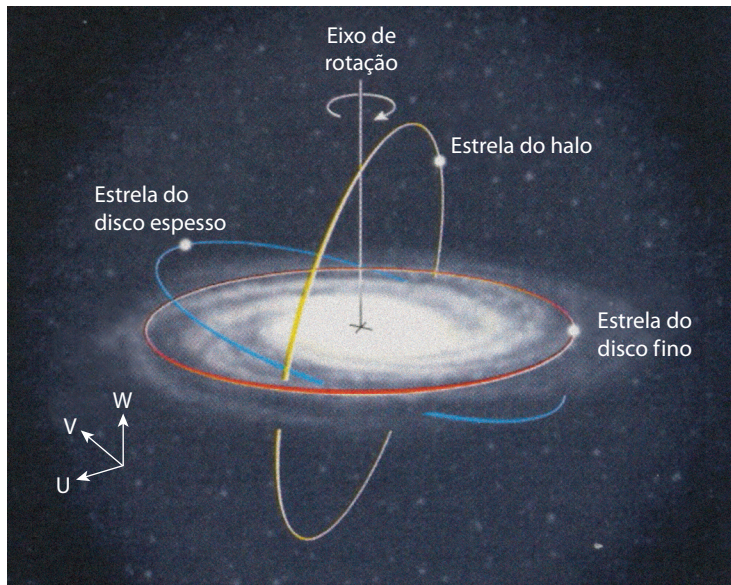
8.4.10 MOLÉCULAS INTERESTELARES

Mais de uma centena de moléculas são conhecidas no meio interestelar, em especial nas nuvens densas, ou nuvens moleculares, sítios de formação estelar. Elas variam de simples moléculas e radicais diatômicos até longas cadeias contendo mais de dez átomos. Parte considerável dessas moléculas inclui átomos de C e H, os mesmos que formam as principais moléculas orgânicas associadas à vida.

As moléculas mais importantes no meio interestelar são o H_2 e o CO, que estão entre as mais abundantes. O hidrogênio molecular, apesar de muito abundante, é de difícil detecção, de modo que quase sempre se utiliza o CO para investigar regiões moleculares densas. O CO pode ser observado em rádio, e tem uma linha muito intensa em 4,6 mm. As nuvens moleculares são importantes no processo de formação de estrelas, uma vez que elas se formam pela condensação de material interestelar, localizado nas suas regiões mais densas, justamente as nuvens moleculares.

8.4.11 EQUILÍBRIO NO MEIO INTERESTELAR

As diversas fases que formam o meio interestelar apresentam certo equilíbrio, no sentido de as densidades de energia armazenadas em cada fase serem semelhantes. Isso pode ser conferido na tabela 3, que mostra a densidade volumétrica média, temperatura cinética média e a pressão do gás para algumas das principais fases interestelares. Esses resultados sugerem que as fases mais densas estão em equilíbrio de pressão segundo pressões mais altas, enquanto as fases mais difusas teriam um equilíbrio a pressões mais baixa e semelhantes. Esses resultados são aproximados, mas sugerem que o meio interestelar galáctico alcançou um estado de equilíbrio global. Isso não exclui a possibilidade de processos dinâmicos no meio interestelar, como a expansão de regiões HII e nebulosas planetárias, ventos estelares, expansão de supernovas, as colisões de nuvens interestelares, entre outros.



14- Órbitas das estrelas na Galáxia (C. Chiappini).

8.5 CINEMÁTICA DA GALÁXIA

Os objetos do disco galáctico, em especial os do disco fino, com escala de altura da ordem de algumas centenas de parsecs, têm um movimento global de rotação em torno do centro da Galáxia, enquanto que os objetos do disco espesso e do halo mostram órbitas mais inclinadas em relação ao plano, como mostrado na figura 14.

A rotação galáctica foi descoberta em 1923 pelo astrônomo sueco Carl Charlier (1862-1934), e as principais análises pioneiras desenvolvidas pelo astrônomo holandês Jan H. Oort (1900-1992) e o sueco Bertil Lindblad (1895-1965), na década de 1920. A rotação galáctica é expressa pela curva de rotação, que é essencialmente um gráfico da velocidade linear de rotação em função da distância ao centro galáctico projetada sobre o plano. Dois métodos podem ser geralmente usados para obter a curva de rotação: 1) observações ópticas dos movimentos das estrelas e regiões HII, limitadas a alguns kpc do Sol pela absorção interestelar, e 2) observações em rádio e milimétricas, da linha de 21 cm do H ou das linhas do CO, que fornecem a curva de rotação nas regiões internas da Galáxia.

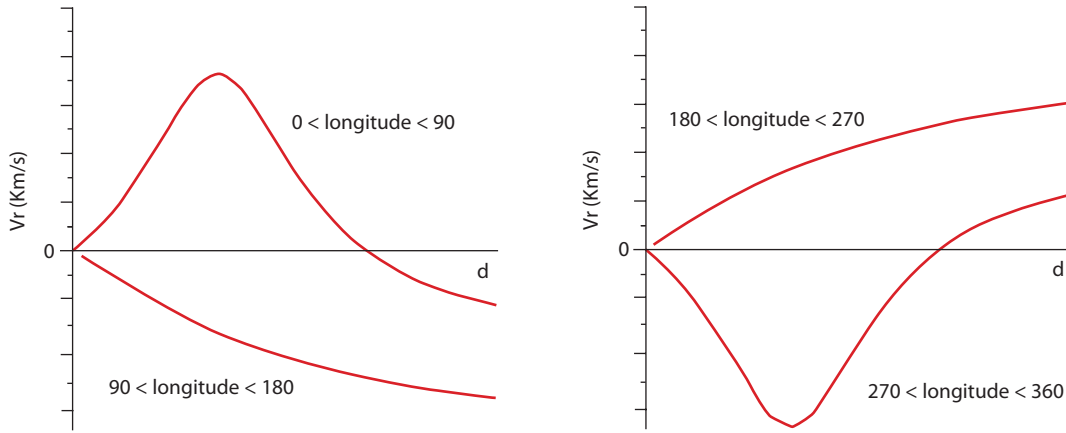
8.5.1 EQUAÇÕES DA ROTAÇÃO GALÁCTICA

É possível medir as velocidades das estrelas na direção da linha de visada, obtendo então sua velocidade radial v_r , e a velocidade perpendicular à linha de visada, portanto a velocidade no plano do céu, ou velocidade tangencial, representada por v_t . Considerando que as estrelas têm órbitas circulares, as velocidades radial e tangencial de uma estrela podem ser escritas

$$v_r = R_0 (\omega - \omega_0) \sin \ell \quad (3)$$

$$v_t = R_0 (\omega - \omega_0) \cos \ell - \omega d \quad (4)$$

onde R_0 é a distância galactocêntrica do Sol, ω é a velocidade angular da estrela considerada, ω_0 é a velocidade angular na posição do Sol, l é a longitude galáctica da estrela e d sua distância. Valores atuais de R_0 e ω_0 são $R_0 = 8 \text{ kpc}$ e $\omega_0 = 25 \text{ km/s/kpc}$. As equações (3) e (4) são muito úteis, parti-



15- Variação da velocidade radial em órbitas keplerianas

cularmente a equação (3), pois medindo a velocidade radial de uma estrela com longitude conhecida, pode-se obter a velocidade angular de rotação na posição da estrela. Se a velocidade tangencial também for conhecida, é possível usar a relação (4) para estimar a distância da estrela. Essas equações podem ser ainda simplificadas no caso de objetos próximos ao Sol, mas na forma acima são bastante gerais, admitindo apenas que as órbitas das estrelas em relação ao centro galáctico são circulares. A velocidade angular ω está relacionada à velocidade linear de rotação Θ pela expressão

$$\Theta = \omega R \quad (5)$$

Na posição do Sol temos $\Theta_0 = \omega_0 R_0 = 200 \text{ km/s}$. Conhecendo a velocidade angular, pode-se obter a velocidade linear, se a distância galactocêntrica for conhecida. Assim, é possível construir a curva de rotação da Galáxia.

8.5.2 ROTAÇÃO RÍGIDA E ROTAÇÃO KEPLERIANA

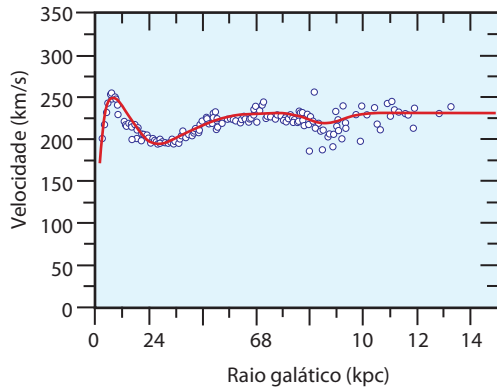
Dois casos simples podem ser considerados para a rotação galáctica, a rotação rígida e a rotação kepleriana. No caso da rotação rígida, todos os objetos deslocam-se à mesma velocidade angular, e a velocidade de rotação aumenta linearmente com a distância galactocêntrica. É o caso da rotação de um disco compacto ou DVD. Esse caso aplica-se de maneira aproximada às regiões mais internas da Galáxia. No caso de órbitas keplerianas, considerando M a massa total da Galáxia, e m a massa contida no raio R , temos que

$$\frac{G M m}{R^2} = \frac{m \Theta^2}{R} \quad (6)$$

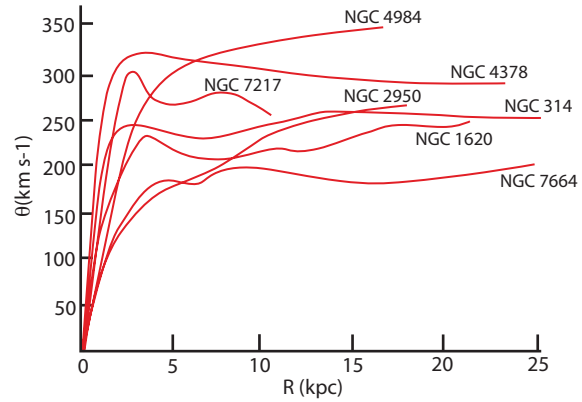
Portanto, a velocidade de rotação em função da posição é dada por

$$\Theta = \left(\frac{G M}{R} \right)^{1/2} \quad (7)$$

ou seja, a velocidade cai com a raiz quadrada da distância galactocêntrica. Da equação (7) temos diretamente uma forma funcional para a curva de rotação. Essa relação não é verificada na Galáxia,



16- A curva de rotação galáctica (J. Lépine).



17- Curvas de rotação de galáxias espirais (M. Zeilik).

isto é, a rotação do disco galáctico não é kepleriana. Apesar disso, é possível obter algumas relações aproximadamente corretas, principalmente pelo fato de que a velocidade angular na rotação kepleriana diminui quando a distância galactocêntrica aumenta, o que é verificado na Galáxia.

O comportamento da velocidade radial com a distância da estrela pode ser resumido como indicado esquematicamente na figura 15. Para os quadrantes internos, com longitudes entre 0 e 90 graus, a velocidade radial atinge um máximo para certa distância R_m , decrescendo em seguida. Situação inversa ocorre para longitudes entre 270 e 360 graus. Essa velocidade radial máxima corresponde a uma distância galactocêntrica mínima R_m , coerente com o fato de que a velocidade angular decresce quando R aumenta.

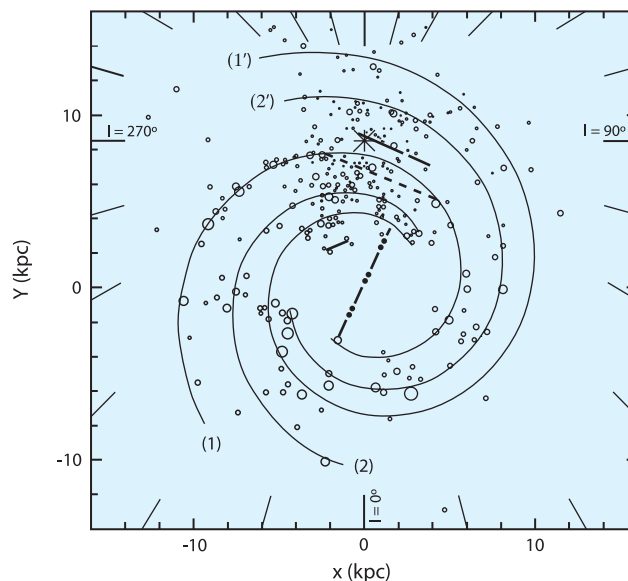
8.5.3 FÓRMULAS DE OORT

No caso de objetos relativamente próximos ao Sol, as equações (3) e (4) assumem uma forma mais simples. Em 1927, J. H. Oort mostrou que as velocidades radial e tangencial podem ser escritas

$$v_r \approx A d \sin 2\ell \quad (8)$$

$$v_t \approx d (A \cos 2\ell + B) \quad (9)$$

Essas são as fórmulas de Oort, e A e B são as constantes de Oort, dois parâmetros básicos da rotação galáctica determinados a partir de medidas das velocidades de objetos da vizinhança solar, como estrelas variáveis cefeidas, RR Lyrae, nebulosas etc. Os resultados indicam os valores médios $A = 16 \text{ km/s/kpc}$ e $B = -11 \text{ km/s/kpc}$. Com esses valores é possível estimar alguns grandezas importantes para a rotação galáctica, como o tempo médio de rotação do Sol em torno do centro galáctico de cerca de 230 milhões de anos. É possível ainda usar essas equações para obter as distâncias de objetos relativamente próximos, bastando para isso medir sua velocidade radial e longitude galáctica.



18- Estrutura dos braços espirais da Galáxia (D. Russeil).

8.5.4 A CURVA DE ROTAÇÃO

A partir de medidas da velocidade radial é possível obter a curva de rotação, usando a equação (3), uma vez que a distância seja conhecida. Isso pode ser feito a partir de técnicas radioastronômicas para os quadrantes internos ao círculo solar, e observações ópticas nos demais casos. A curva pode ser definida para distâncias galactocêntricas até cerca de 16 a 18 kpc do centro, como mostrado na figura 16.

Essa curva é consistente com rotação rígida nas regiões internas da Galáxia, onde a velocidade aumenta com R , mas na região mais externa não diminui como previsto pelas órbitas keplerianas. O fato de a curva de rotação ser aproximadamente constante além do círculo solar pode ser explicado pela existência de matéria não luminosa, ou matéria escura, nessa região. De fato, a curva de rotação da Galáxia pode ser interpretada em termos de três componentes: a região esferoidal do bojo, a região do disco galáctico e a região externa contendo a matéria escura, responsável pela parte plana da curva de rotação. Para outras galáxias espirais, curvas semelhantes são também observadas, como mostrado na figura 17.

8.6 ESTRUTURA GALÁCTICA E BRAÇOS ESPIRAIS

Como mencionado, observações na linha de 21 cm do H permitem mapear a estrutura do disco galáctico em determinadas direções com precisão. Da mesma forma, regiões HII associadas a estrelas quentes, cujas distâncias podem ser bem determinadas, contribuem significativamente para o mapeamento do disco, em especial dos braços espirais. Segundo esses resultados, a Galáxia é uma espiral com três braços, contendo possivelmente uma barra de 2 a 4 kpc, ligando o bojo ao disco, como ilustrado na figura 18.

A existência dos braços espirais como entidades físicas coloca alguns problemas, pois eles deveriam ser destruídos ou enrolados pela rotação galáctica diferencial. Isto claramente não ocorre, pois apenas alguns poucos braços são observados na Via Láctea e em outras galáxias. A escala de tempo dos braços deveria ser no máximo da ordem de 100 milhões de anos, a idade de seus objetos típicos,

muito menor que a idade da Galáxia, da ordem de 13 bilhões de anos. Portanto, ou existe um mecanismo capaz de compensar o efeito da rotação, ou os braços são equivalentes a zonas de compressão de ondas estacionárias, ou aproximadamente estacionárias, em um sistema de referência em rotação.

8.6.1 ONDAS DE DENSIDADE

A teoria das ondas de densidade parece resolver boa parte dos problemas associados aos braços espirais. Originalmente proposta por Bertil Lindblad, foi posteriormente desenvolvida pelo matemático C. C. Lin e o astrônomo chinês Frank Shu, entre outros. Nessa teoria, máximos de densidade, ou cristas da onda, giram em torno do centro galáctico a uma velocidade angular essencialmente constante, diferente da velocidade angular da matéria, que depende da rotação diferencial e varia com a distância ao centro. Nas partes internas e na maior parte da região observada em comprimentos de onda ópticos, a matéria gira mais rapidamente que a onda e o inverso ocorre nas regiões mais externas. A concentração da matéria nos braços galácticos é devida à aproximação periódica de diferentes partes da Galáxia durante seu movimento. A situação é análoga ao movimento de carros em uma rodovia, em que uma das pistas está em reparos em um determinado ponto: um acúmulo de carros ocorre neste ponto, mas o movimento dos carros impede que a região com maior densidade de carros seja composta sempre pelos mesmos veículos. Fotografias tiradas do alto em dias diferentes podem indicar o deslocamento da região de máxima densidade correspondente ao progresso do trabalho na rodovia. Nesse caso, a velocidade dos automóveis, correspondente à velocidade da matéria, será provavelmente diferente da velocidade com que se processam os reparos na rodovia, a velocidade da onda.

8.7 POPULAÇÕES ESTELARES

8.7.1 O CONCEITO DE POPULAÇÕES ESTELARES

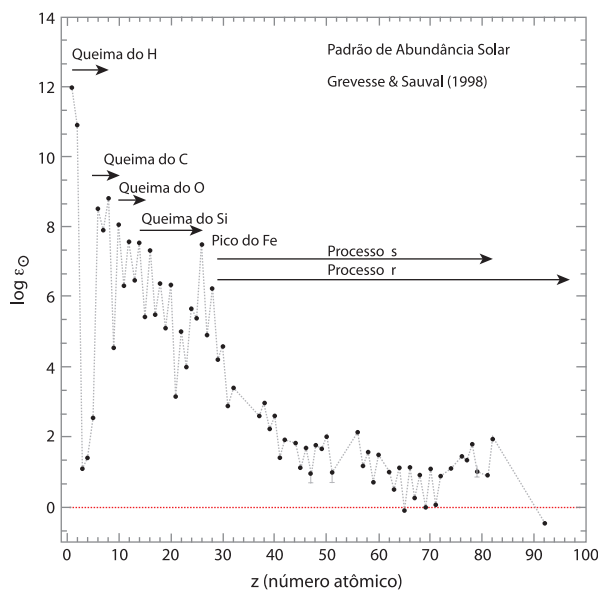
O conceito de populações estelares foi desenvolvido inicialmente pelo astrônomo de alemão naturalizado norte-americano Walter Baade (1893-1960) na década de 1940, a partir de observações

da galáxia de Andrômeda. Nesse objeto, Baade notou que as estrelas mais jovens e azuladas estão concentradas no disco da galáxia e nos braços espirais, enquanto as estrelas mais avermelhadas e velhas se localizam basicamente na região central, ou bojo. Segundo Baade, os objetos se distribuem em duas populações, a população I, composta de objetos mais jovens, azuis e localizados no disco; e a população II, contendo estrelas mais velhas, avermelhadas, localizadas principalmente no bojo e no halo das galáxias.

Esse conceito foi desenvolvido em detalhes e aplicado à Galáxia. Os critérios iniciais de caracterização das populações são a localização e as idades. Atualmente, o conceito de populações estelares está mais sofisticado, e os principais critérios de classificação envolvem idade, composição química, distribuição espacial e características cinemáticas de objetos galácticos. Assim, os objetos de população I são jovens, enriquecidos em elementos pesados (metais), relativamente próximos ao plano galáctico, e em movimento de rotação com baixas dispersões de velocidades. Em contraposição, os objetos de população II são mais velhos, avermelhados, pobres em metais, distantes do plano galáctico, e com órbitas mais excêntricas. Em vez de apenas duas, deve-se considerar mais populações, uma vez que os critérios mencionados têm uma variação aproximadamente continua na Galáxia. Com alguma frequência são mencionadas cinco populações, que incluem a população I extrema (exemplo: regiões HII), I velha (o Sol), disco (nebulosas planetárias de tipo II), II intermediária (estrelas de alta velocidade) e II halo (aglomerados globulares).

8.7.2 POPULAÇÕES ESTELARES E AS PRINCIPAIS REGIÕES DA GALÁXIA

Vimos que as quatro regiões principais da Galáxia são o disco fino, o disco espesso, o bojo e o halo. Podemos associar as populações estelares da Galáxia a essas regiões, usando alguns dos critérios que definem as populações estelares. Como exemplo, pode-se usar como indicador de metalicidade o índice $[Fe/H]$, que mede essencialmente a abundância desses elementos em relação à abundância solar. Quando o índice $[Fe/H] = 0,0$, a abundância é igual à do Sol, $[Fe/H] = -1,0$ significa dez vezes menos elementos pesados que no Sol etc. Temos tipicamente, $[Fe/H] > -0,6$ para o disco fino; para o disco espesso, temos $-1 < [Fe/H] < -0,6$, para o bojo, $-1,5 < [Fe/H] < 1,0$, e para o halo $[Fe/H] < -1,0$.



19- Abundâncias no Sistema Solar (A. A. Brito).

Ao contrário de outras galáxias, como Andrômeda, o bojo da Galáxia não pode ser observado com muitos detalhes no óptico, devido à extinção interestelar. Em imagens profundas pode ser observado que na região central, na direção de Sagittarius, há uma grande concentração de estrelas, muitas vezes maior que na vizinhança solar. Próximo ao centro, a densidade das estrelas alcança cerca de cem mil estrelas por parsec cúbico, de modo que sua separação média é muito menor que na vizinhança solar. Esse fenômeno é também observado em outras galáxias, e está relacionado ao processo de formação da Galáxia. Na região central pode ser observada uma intensa fonte rádio, Sagittarius A. As velocidades de rotação no anel interno desta fonte sugerem que o objeto responsável pela emissão é compacto, com massa da ordem de um milhão de massas solares. Assim como em outras galáxias, acredita-se que a Via Láctea contenha em seu interior um buraco negro supermassivo.

8.7.3 ABUNDÂNCIAS QUÍMICAS

As diferentes regiões galácticas são compostas basicamente de hidrogênio, com cerca de 10% de hélio por número de átomos. Os elementos leves Li, Be e B são pouco abundantes, e formados essencialmente pelo processo de espalação interestelar (para a nucleossíntese primordial, ver as seções 8.9 e 10.8). Os demais, chamados “metais”, têm abundâncias cerca de dez mil vezes menor que o H, ou menos que isso, mas com papel importante na evolução química da Galáxia. Portanto, em média, as abundâncias não têm uma variação muito grande, o que levou à ideia de uma abundância “cósmica”, embora esse conceito não seja muito rigoroso. Entretanto, é útil considerar abundâncias médias, mas aplicáveis ao Sistema Solar, basicamente medidas na fotosfera solar e nos meteoritos.

As abundâncias médias dos principais elementos químicos no Sistema Solar estão mostradas na figura 19, dadas em função do número atômico Z . Na figura estão assinalados alguns dos principais processos de formação dos elementos químicos e os elementos formados correspondentes, como a queima de H, C, O e Si e os chamados processos s e r. As abundâncias são dadas na forma $\epsilon(X) = \log n(X)/n(H) + 12$, por número de átomos. Nesse caso, a abundância do H é igual a 12, a do hélio é igual a 10,99, ou seja, cerca de dez por cento da abundância de H, e a do oxigênio é igual a 8,7, havendo então cerca de dois mil átomos de H para cada átomo de oxigênio.

8.8 FORMAÇÃO DE ESTRELAS

8.8.1 COLAPSO E FRAGMENTAÇÃO

As nuvens moleculares gigantes, onde objetos jovens e brilhantes estão imersos em nuvens de gás e poeira, são verdadeiros berçários de estrelas. Entretanto, a teoria da formação estelar a partir do colapso e fragmentação dessas nuvens ainda tem muitos pontos obscuros, e a formação estelar é, de fato, a fase menos conhecida da evolução desses astros.

A ideia básica da formação estelar considera que estágios sucessivos de fragmentação e colapso são eficientes para reduzir as massas das nuvens moleculares até as dimensões estelares, ao mesmo tempo aumentando suas densidades em várias ordens de grandeza. Este processo é denominado fragmentação hierárquica, sendo influenciado pelas condições físicas da nuvem, sua massa e dimensões, pela presença de campos magnéticos, rotação etc. O processo continua até a formação de uma estrutura muito densa e opaca, onde a temperatura é suficientemente alta para a ignição termonuclear.

8.8.2 O CRITÉRIO DE JEANS

As estrelas se formam a partir de nuvens interestelares, por um processo de instabilidade gravitacional que leva à contração da nuvem, até que as regiões centrais atinjam densidades e temperaturas suficientes para a ignição nuclear. Para uma nuvem homogênea, infinita e em repouso, as instabilidades levam à contração gravitacional se as condições físicas da nuvem forem de forma a que a energia potencial gravitacional de uma partícula a certa distância do centro da nuvem supere a energia cinética da partícula. Nesse caso, podemos mostrar que a massa da nuvem deve satisfazer a relação

$$M_j \approx 1,4 \times 10^{-10} \frac{T^{3/2}}{\rho^{1/2} \mu^{3/2}} M_{\odot} \quad (10)$$

onde a massa da nuvem está em massas solares, T é a temperatura do gás em graus K, ρ é a densidade

em g/cm^3 , e μ é o peso molecular médio. A massa M_J é chamada a massa de Jeans. Nesse caso, a instabilidade se propaga, havendo a formação de um objeto colapsado em uma escala de tempo da ordem do tempo de queda livre, isto é, o colapso é essencialmente controlado pela gravidade. Em uma nuvem interestelar típica, as massas são da ordem das massas dos aglomerados globulares e das nuvens moleculares gigantes. À medida que o colapso se processa, a densidade aumenta e tanto a massa de Jeans como o tempo de queda livre decrescem. A fragmentação termina quando a massa dos fragmentos equivale à ordem da massa das estrelas.

8.9 FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DA GALÁXIA

O conceito de populações estelares é consistente com um colapso inicial rápido na Galáxia, quando foi formada a componente esferoidal (halo) e a condensação central (bojo). As estrelas do halo têm altas dispersões de velocidades e são pobres em metais por um fator da ordem de dez ou superior, em relação ao Sol. Desde o trabalho clássico de Eggen, Lynden-Bell e Sandage em 1962, esse fato tem sido interpretado como evidência de que o halo se formou primeiro, antes que o enriquecimento pelas mortes das estrelas massivas tivesse ocorrido. Como as estrelas formam-se a partir do gás interestelar, pode-se concluir que a formação estelar no halo é atualmente limitada pela escassez de gás e poeira naquela região. Dotada de um movimento de rotação, a nebulosa pregaláctica sofreu um segundo colapso em direção ao plano galáctico, dando origem ao disco, com suas populações mais jovens, e explicando portanto as diferenças de distribuição espacial e metalicidade observadas entre o halo e o disco. Após a formação do disco, perturbações de natureza gravitacional, possivelmente complicadas por forças magnéticas, deram origem à estrutura espiral.

Com os valores atuais para a idade do Universo, a formação da Galáxia deve ter sido iniciada há pouco mais de dez bilhões de anos. Os objetos de população II do halo, como os aglomerados globulares, foram os primeiros a serem formados. É possível que uma geração anterior de estrelas, ditas de população III, tenha sido formada, embora não existam provas inequívocas de sua existência. Em seguida, foram formados objetos do bojo, com idades semelhantes aos do halo. Finalmente, ocorreu a formação do disco, cuja contração ocorreu em uma escala de tempo da ordem do tempo de queda

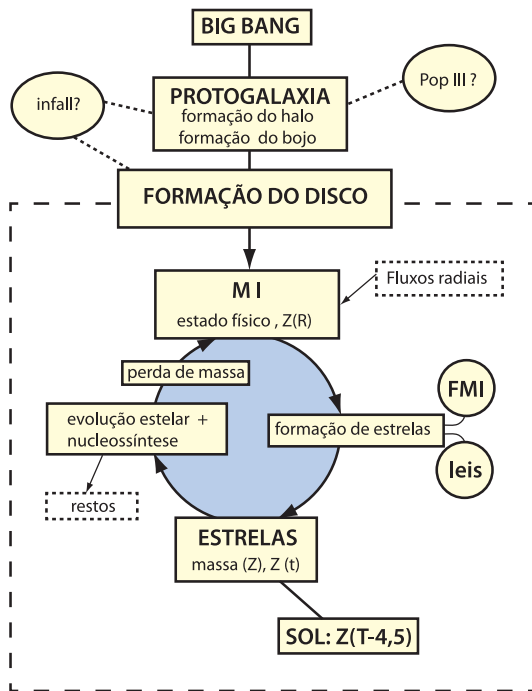
livre, cerca de 300 milhões de anos. A contração do disco em direção ao bojo foi impedida pelo movimento de rotação associado à nebulosa pregaláctica. A formação de estrelas no disco ocorre até hoje, de modo que podemos distinguir nesta região objetos com idades diferentes.

As diferenças na composição química das populações estelares da Galáxia ajustam-se também a esse esquema. No modelo padrão, foram inicialmente formados os elementos leves D, ^3He , ^4He , e ^7Li . Os elementos pesados, como C, N, O etc., tiveram origem no interior das estrelas, isto é, só começaram a ser sintetizados após a formação da primeira geração de estrelas. Assim, os objetos mais velhos do halo (população II) devem ter baixo conteúdo de elementos pesados, o que é confirmado pelas observações. À medida que a evolução se processa, o gás enriquecido é devolvido ao meio interestelar pelas supernovas, nebulosas planetárias e outros processos de perda de massa, de modo que, em média, os objetos mais jovens apresentam maior abundância de elementos pesados.

O cenário “monolítico” para a formação da Galáxia é muito atraente, e consegue explicar uma série de observações, mas sofreu muitas modificações nos últimos 40 anos. Em particular, um aspecto importante da formação da Galáxia, que distingue os modelos atuais daqueles modelos monolíticos iniciais, refere-se aos processos de *infall*, ou queda de matéria no disco e halo galácticos. A Via Láctea integra um conjunto de galáxias, o Grupo Local, e parte do material dessas galáxias pode interagir com o gás da Galáxia, afetando o processo de formação estelar.

8.9.1 EVOLUÇÃO GALÁCTICA E EVOLUÇÃO QUÍMICA

A evolução da Galáxia compreende a evolução dinâmica e a evolução química. Esses aspectos estão correlacionados e ocorrem simultaneamente, embora sejam geralmente estudados de maneira independente. Em particular, a evolução química da Galáxia passa pelo estudo da composição química das estrelas, gás etc., em termos da produção dos elementos pelas estrelas e do processo de ejeção e mistura dos elementos no meio interestelar. Seus objetivos incluem o estudo das distribuições de abundâncias dos elementos, variações de metalicidade com a idade e posição, gradientes e variações nas abundâncias relativas dos elementos pesados etc. Um esquema da evolução química da Galáxia é mostrado na figura 20. Note-se a presença inicial do Big Bang, quando ocorreu a nucleossíntese primordial, e a posterior formação da Galáxia, em particular do halo e do disco, em épocas diferentes.



20- Evolução química da Galáxia.

Do ponto de vista da evolução química da Galáxia, estamos particularmente interessados na circulação de matéria entre o gás e as estrelas. A partir do meio interestelar são formadas as estrelas, com a ação de eventuais fluxos radiais e presença de queda de material, segundo uma certa função de massa inicial (IMF) e uma taxa de formação estelar (SFR). Essas estrelas evoluem, produzem novos elementos, pelo processo de nucleossíntese estelar, sofrem perda de massa em várias etapas de sua evolução, e finalmente devolvem o material ao meio interestelar, a menos dos restos inertes. Nesse processo, o gás tem sua composição alterada ao longo da vida da Galáxia. Em particular, o próprio material de que somos feitos, como os átomos de carbono que constituem o nosso corpo, foi um dia sintetizado no interior de estrelas que morreram há alguns bilhões de anos.

CAPÍTULO 9

Galáxias

Gastão B. Lima Neto

9.1 INTRODUÇÃO: O QUE SÃO GALÁXIAS

9.2 DESCOBERTA DAS GALÁXIAS E DA VIA LÁCTEA

9.3 FORMA DAS GALÁXIAS

9.3.1 GALÁXIAS ELÍPTICAS

9.3.2 GALÁXIAS ESPIRAIS

9.4 CURVAS DE ROTAÇÃO

9.5 DISTRIBUIÇÃO EM GRANDE ESCALA

9.5.1 DISTRIBUIÇÃO DE GALÁXIAS: GRUPO LOCAL

9.5.2 GRUPOS COMPACTOS

9.5.3 AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

9.5.4 SUPERAGLOMERADOS

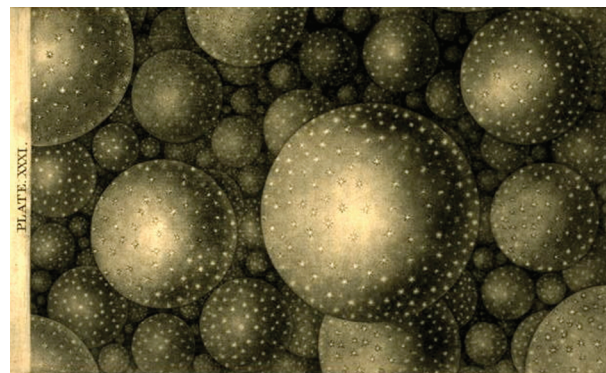
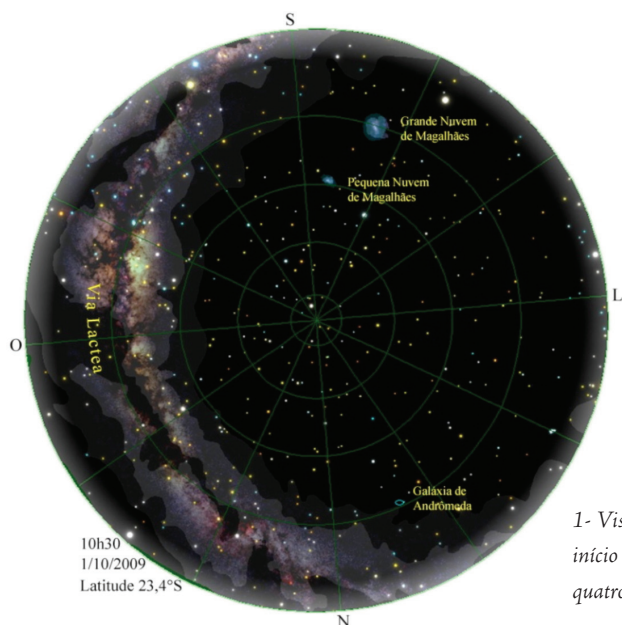
9.5.5 ESTRUTURA EM GRANDE ESCALA

9.6 GALÁXIAS PECULIARES: COLISÕES GALÁCTICAS

9.6.1 GALÁXIAS ATIVAS, RADIOGALÁXIAS E QUASARES

9.7 FORMAÇÃO DE GALÁXIAS

9.8 LENTES GRAVITACIONAIS



2- “Universos-Ilha” imaginado por Thomas Wright e popularizado por Immanuel Kant a partir de 1755. A Via Láctea seria uma dessas esferas de estrelas.

1- Vista panorâmica do céu de São Paulo no início de outubro, quando podemos observar quatro galáxias ao mesmo tempo.

9.1 INTRODUÇÃO: O QUE SÃO GALÁXIAS

Imagine que você esteja próximo do Trópico de Capricórnio, longe dos centros urbanos, sem poluição luminosa em uma noite sem nuvens. São cerca de 22h30 e você pode identificar quatro galáxias. A primeira é a Via Láctea, a galáxia na qual nos encontramos, estendendo-se como um grande círculo cortando a esfera celeste. Sua aparência é nebulosa e irregular, com regiões mais claras e regiões mais escuras.

As duas outras galáxias aparecem muito menores no céu: são as Nuvens de Magalhães, a Pequena e a Grande. Elas são observadas aproximadamente na direção do Polo Sul Celeste como duas nebulosas que acompanham o movimento aparente diário da esfera celeste.

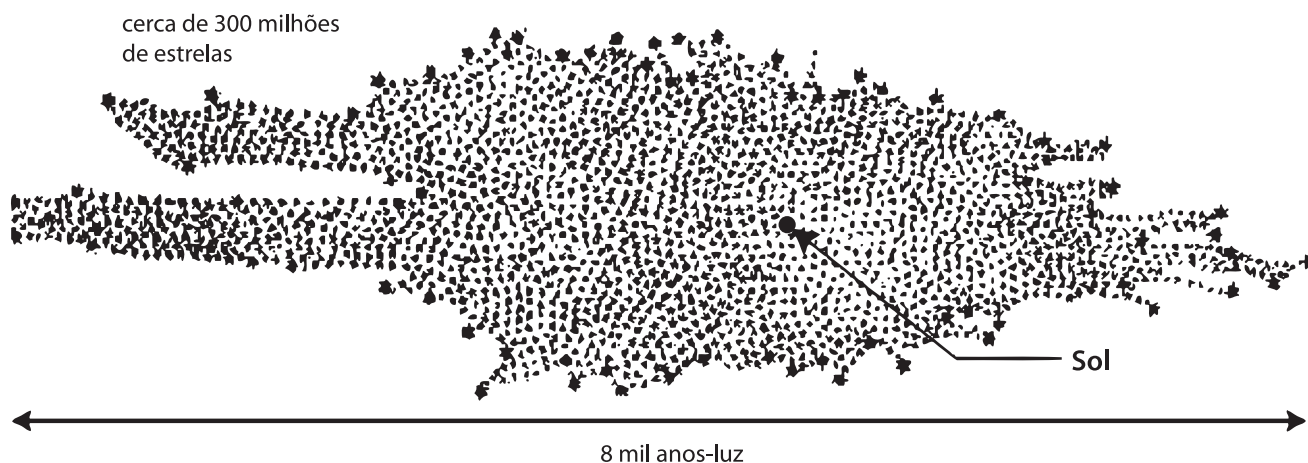
Finalmente, a quarta galáxia visível está na direção oposta, próxima do horizonte na direção entre o Norte e o Nordeste. É a galáxia da constelação de Andrômeda, difícil de ser observada a olho nu.

Essas galáxias têm em comum o aspecto nebuloso que lhes valeu o nome de nebulosas até a década de 1930. Essa aparência nebulosa ou leitosa é resultado do brilho de bilhões (e mesmo trilhões) de estrelas quando não podemos vê-las separadamente, isto é, resolvê-las. Devido à dificuldade em medir grandes distâncias extragalácticas por muito tempo se cogitou que as galáxias seriam nebulosas da Via Láctea.

Galáxias são associações ligadas pela gravitação compostas de estrelas, gás e poeira interestelar, e de matéria escura. Enquanto estrelas, gás e poeira podem ser observados pela luz emitida ou absorvida, a presença de matéria escura é deduzida por métodos indiretos: por exemplo, pela observação do movimento das estrelas ou do gás em uma galáxia.

As galáxias apresentam formas e tamanhos diversos. Há galáxias com trilhões de estrelas e outras somando apenas dezenas de milhões de estrelas. Existem galáxias com forma achatada como um disco (caso da Via Láctea) e outras praticamente esféricas. Comparadas com a dimensão do Sistema Solar, as galáxias são gigantescas, tão grandes que a probabilidade de uma colisão de duas de suas estrelas é praticamente nula.

As galáxias se distribuem pelo Universo como ilhas em um imenso oceano, formando em geral “arquipélagos”, ou seja, grupos reunindo de alguns poucos objetos a milhares deles. Vivemos em um universo de galáxias.



3- Mapa da Via Láctea, com a posição do Sol próxima do centro Galáctico, feito por William e Carolina Herschel em 1785.

9.2 DESCOBERTA DAS GALÁXIAS E DA VIA LÁCTEA

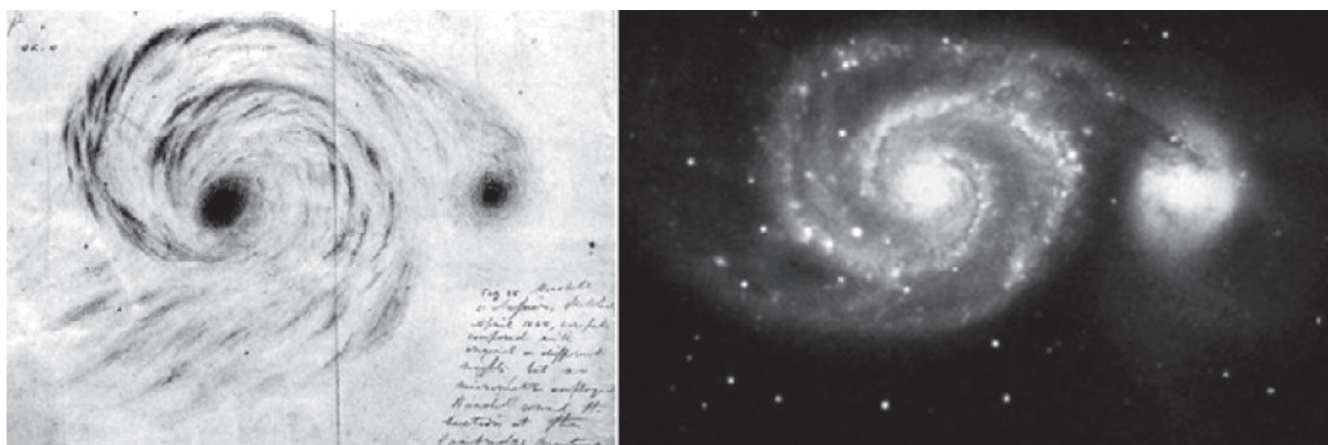
As galáxias tiveram sua natureza reconhecida apenas nos anos 20 do século passado. Até então, eram identificadas apenas como “nebulosas” e suas dimensões, entre outras características, eram ignoradas. Poucos objetos de aparência difusa eram conhecidos na Antiguidade e o primeiro registro documentado da galáxia de Andrômeda foi feita em 964 pelo astrônomo persa Abd-al-Rahman al-Sufi (903-986) em seu “Tratado sobre as estrelas fixas”. A Grande Nuvem de Magalhães também é mencionada por al-Sufi, que a descreve como uma “nuvem” (chamada por ele de al-Bakr) visível no sul da península arábica.

Com a introdução do telescópio para fins astronômicos por Galileu, em 1609, as nebulosas começam a ser descobertas em número cada vez maior. O próprio Galileu foi o primeiro a reconhecer que a Via Láctea é composta por um vasto número de estrelas, a maior parte deles aparentemente fracas, que resolveu com seu pequeno telescópio. Em 1612, em seguida às primeiras observações de Galileu, o astrônomo alemão Simon Mayr (1573-1624) redescobriu a nebulosa de Andrômeda com o uso de telescópio. Em 1716 o astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1742) fez uma revisão das observações e descobertas então recentes, discutindo a misteriosa natureza das “manchas luminosas e nebulosas” do céu.

Na metade do século 18, o astrônomo inglês Thomas Wright (1711-1786) sugeriu que as estrelas na Via Láctea se distribuem como uma casca esférica e que as misteriosas nebulosas seriam sistemas semelhantes à Via Láctea. Essa ideia foi abraçada pelo filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) que, em 1755, discutiu a ideia de “universos-ilha” para descrever sistemas como a Via Láctea.

As galáxias eram então confundidas com as nebulosas (gás interestelar que brilha graças à luz das estrelas próximas) presentes nos catálogos do francês Charles Messier e do inglês (nascido na Alemanha) William Herschel elaborados no século 18, onde eram identificadas algumas “nebulosas”. William Herschel (1738-1822) junto com sua irmã Carolina, fez o primeiro mapa da Via Láctea baseado em contagens de estrelas.

Durante a década de 1840, William Parson (Lord Rosse 1800-1867) construiu na Irlanda o que foi o maior telescópio do mundo por mais de meio século, com 1,83 metro de diâmetro. Com esse



4- Esquerda: desenho feito por Lord Rosse de sua observação da galáxia M51. Direita: fotografia da mesma galáxia feita no Monte Palomar.

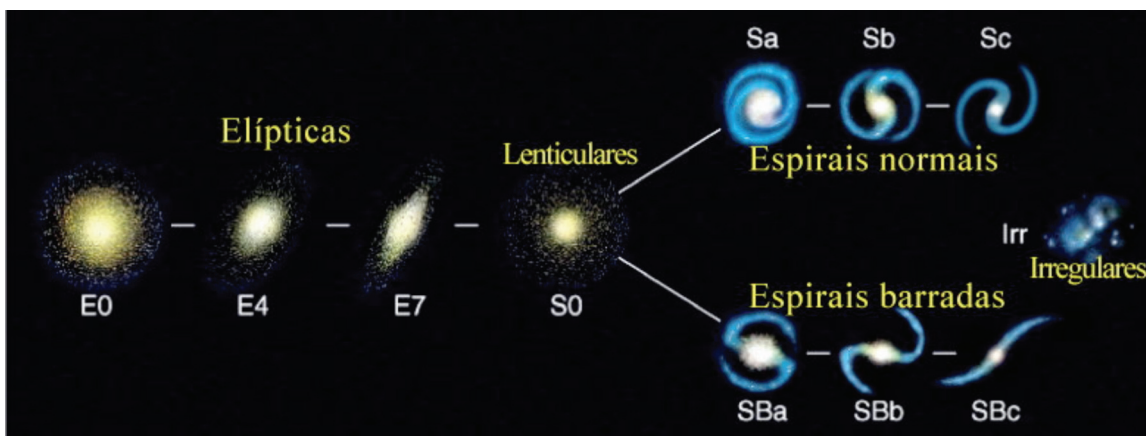
instrumento, Lord Rosse pôde distinguir os braços espirais em algumas nebulosas. Essas observações aumentaram ainda mais o mistério sobre as nebulosas, incluindo sua origem e natureza. Os braços espirais sugerem movimento circular e isso levou alguns astrônomos da época a pensar que essas estruturas seriam sistemas planetários em formação.

Em 1920, existiam duas correntes de pensamento em relação às “nebulosas”. Uma, defendida pelo astrônomo norte-americano Harlow Shapley (1885-1972), propunha que a Via Láctea era muito grande, com o Sol localizado longe do centro e todas as nebulosas estariam contidas nela. A outra corrente, defendida pelo astrônomo também norte-americano Herber Curtis (1872-1942), propunha uma Via Láctea pequena, o Sol no centro e as nebulosas espirais e elípticas seriam “universos-ilhas”, semelhantes à Via Láctea. Apesar de nenhuma dessas teorias estar completamente correta, esse debate é considerado por muitos astrônomos como o início da astrofísica extragaláctica moderna. O grande problema, e o que de certa forma gerou esse debate, foi a dificuldade da determinação de distâncias.

Em meados da década de 1920 o astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953) mediu a distância de algumas nebulosas mais próximas e constatou que estão realmente distantes, exteriores à Via Láctea. Para isso Hubble se baseou no trabalho da astrônoma norte-americana Henrietta Leavitt (1868-1921) quem descobriu a relação entre o período de pulsação e a magnitude absoluta das estrelas variáveis Cefeidas. Usando o telescópio recém-inaugurado de Monte Wilson, com 2,5 metros de diâmetro, Hubble resolveu estrelas Cefeidas nas galáxias vizinhas e mediu seus períodos de pulsação para determinar suas distâncias.

Em 1929, Hubble mostrou que o Universo está em expansão e as galáxias se afastam umas das outras com velocidade proporcional à distância em que se encontram. Se as galáxias estão se afastando hoje, então, no passado estavam mais próximas. Levando esse raciocínio ao extremo, chega-se à hipótese do Big Bang, situação em que toda a matéria estaria concentrada em um ponto, há cerca de 14 bilhões de anos.

Hoje ainda existem várias questões em aberto na astrofísica de galáxias, principalmente ligadas à formação e evolução desses objetos.



5- O sistema de classificação de Hubble se aplica às galáxias brilhantes e próximas (até cerca de seis bilhões de anos-luz), pois eram estas as galáxias que podiam ser observadas até a década de 1930.

9.3 FORMA DAS GALÁXIAS

As galáxias apresentam formas, cores e tamanhos variados. Um dos grandes feitos da astronomia extragaláctica, nas décadas de 1920 e 1930, foi a concepção por Edwin Hubble de um sistema de classificação galáctica baseado na morfologia. O objetivo de um sistema de classificação é ordenar a informação para melhor compreender a natureza dos objetos de estudo.

O primeiro sistema de classificação morfológico de nebulosas é de 1908, proposto pelo astrônomo alemão Maximilian Wolf (1863-1932). Posteriormente, Joseph B. Reynolds simplificou esse sistema definindo apenas sete classes morfológicas relacionadas à importância da concentração central de luz em relação à extensão da nebulosa. Ambos os sistemas não distinguem galáxias de nebulosas de nossa própria Galáxia.

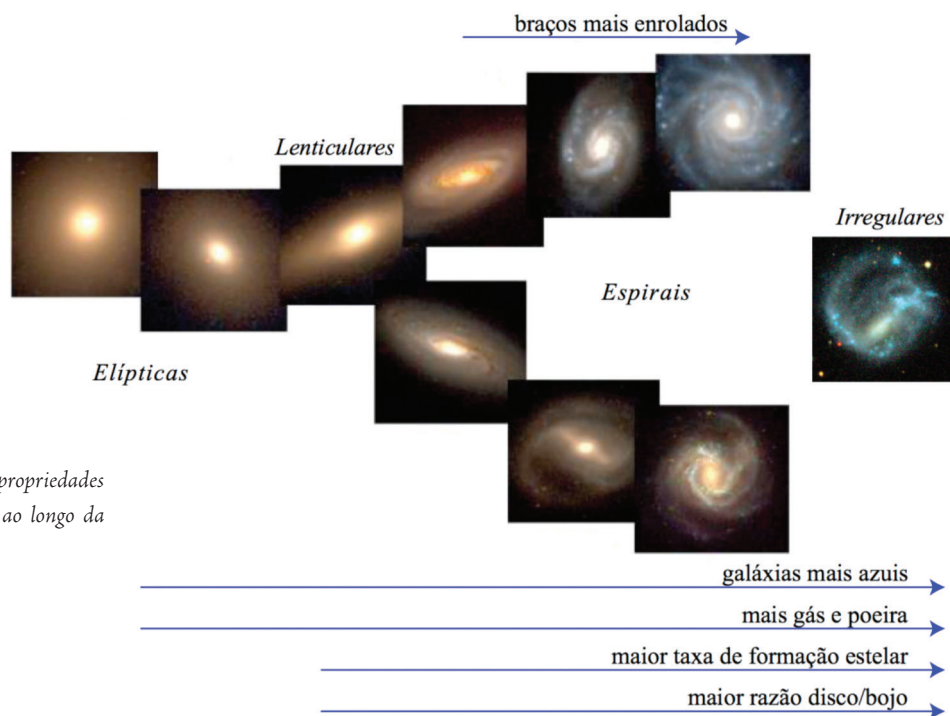
Edwin Hubble foi o primeiro a propor um sistema de classificação exclusivo para galáxias em 1926 e aperfeiçoado em 1936 em seu famoso livro *The realm of nebulae*. O sistema de classificação de Hubble, usado até agora, divide as galáxias em quatro tipos morfológicos: elípticas, espirais (normais e barradas), lenticulares e irregulares. Devido à sua representação gráfica, esta classificação é conhecida como sistema de diapasão.

Em analogia com a nomenclatura da classificação estelar, as galáxias elípticas e lenticulares foram chamadas por Hubble de “tipo precoce” (em inglês, *early type*) enquanto que as galáxias espirais e irregulares são de “tipo tardio” (em inglês *late type*). Essa nomenclatura foi inicialmente relacionada por alguns astrônomos como sendo uma sequência evolutiva: as galáxias se formariam com morfologia elíptica e evoluiriam para morfologia espiral e irregular. Mas essa evolução não ocorre, ainda que a terminologia “precoce/tardio” continue a ser usada.

As galáxias elípticas têm aparência de um esferoide (em geral como uma esfera achatada) sem estruturas notáveis, algo como uma enorme bola de estrelas, mas tão distante que não podemos distinguir as estrelas individualmente. As elípticas são classificadas segundo o grau de achatamento: as galáxias com aparência esférica são as E0 e as galáxias mais achatadas, com forma semelhante a um charuto, são as E7. Galáxias elípticas mais achatadas que E7 são dinamicamente instáveis e extremamente raras.

Galáxias espirais são muito mais achatadas que as elípticas, com a maior parte das estrelas distribuídas como em um disco fino. Na região central as estrelas estão em um arranjo mais esférico,

6- Variação das propriedades globais das galáxias ao longo da sequência de Hubble.



geralmente semelhante a uma minigaláxia elíptica; esse é o bojo da galáxia. No disco das galáxias espirais, nota-se a presença de uma estrutura que lembra braços saindo do bojo. São esses braços que desenham uma espiral no disco, responsáveis pelo nome deste tipo de galáxia.

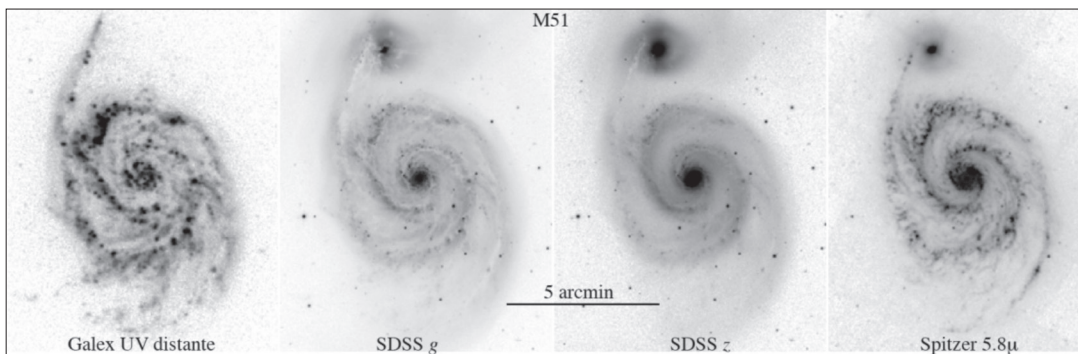
As galáxias espirais são subdivididas em duas classes: as normais e as barradas (estas ganham um B no nome). Nas galáxias espirais barradas, os braços espirais começam no final de uma distribuição de estrelas que se assemelha a uma barra no centro da galáxia. Nas espirais normais, os braços começam próximos da região central, o bojo. O sistema de classificação é tal que as Sa ou SBa são as galáxias com os braços mais enrolados e com os bojos mais brilhantes. As Sc ou SBc são aquelas com os braços mais abertos e com os menores bojos.

Existe uma classe intermediária de galáxias, que apresentam um pequeno disco e um grande bojo, mas não mostram evidência de braços. São as galáxias chamadas lenticulares. Elas parecem uma galáxia elíptica imersa em um disco estelar. As galáxias lenticulares também têm a mesma cor das elípticas, razão de serem facilmente confundidas com essas, especialmente quando distantes.

Por fim, as galáxias que não se enquadram em nenhuma dos três tipos descritos são classificadas como irregulares. Essas galáxias têm formas arbitrárias, sem apresentar um eixo de simetria. As Nuvens de Magalhães, observadas do hemisfério Sul, são exemplos de galáxias irregulares, vizinhas à Via Láctea.

Embora a classificação morfológica de Hubble tenha sido vista erroneamente como uma sequência evolutiva das galáxias, é muito importante, pois várias propriedades físicas se alteram sistematicamente ao longo desse diagrama:

- ♦ Razão “massa (luminosidade) do bojo/massa do disco” – as elípticas são praticamente apenas bojo (discos muito fracos eventualmente são detectados); as galáxias irregulares não contêm bojo;
- ♦ Razão “massa do gás/massa das estrelas” – essa razão é pequena nas elípticas e maior nas espirais e irregulares;
- ♦ Variação da cor – as elípticas e lenticulares são mais avermelhadas enquanto as espirais e irregulares são mais azuladas;
- ♦ Taxa de formação estelar – aumenta das elípticas para as irregulares.



7- Mudança da aparência de uma galáxia quando vista em diferentes filtros espectrais. Da esquerda para a direita: ultravioleta, visível, infravermelho próximo, infravermelho médio. Note que no ultravioleta, a galáxia anã acima de M51 não aparece, pois não tem estrelas massivas.

Propriedade	Espirais	Elípticas/Lenticulares	Irregulares
Massa (sol)	$10^9 - 10^{12}$	$10^7 - 10^{13}$	$10^8 - 10^{11}$
Diâmetro (kpc)	5 – 30	1 – 1000	1 – 10
Luminosidade (sol)	$10^8 - 10^{11}$	$10^6 - 10^{12}$	$10^7 - 10^9$
Pop. Estelar	jovem e velha	velha	jovem
Tipo Espectral	A à K	G à K	A à F
Gás	Bastante	muito pouco	bastante
Poeira	Bastante	muito pouca	depende
Cor	azulada no disco amarelada/vermelha no bojo	amarelada/vermelha	azulada

Tabela 1- Resumo das propriedades das galáxias da sequência de Hubble.

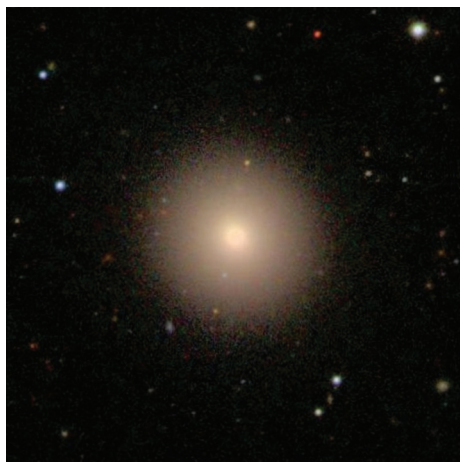
Em nossa vizinhança, dentro de 1 ou 2 bilhões de anos-luz, cerca de 70% das galáxias brilhantes são espirais: 10% são elípticas, 14% lenticulares e 6% irregulares. Essa distribuição morfológica depende de vários fatores como densidade do ambiente onde contamos as galáxias, distância das galáxias e banda fotométrica em que as observamos. Por exemplo, a grandes distâncias (além de 10 bilhões de anos-luz) a fração de galáxias irregulares é muito maior, enquanto nos grandes grupos de galáxias encontramos muitas elípticas e poucas espirais.

Essas porcentagens não levam em conta as galáxias anãs, dificilmente observadas a grandes distâncias. Considerando as anãs, concluímos que são as mais abundantes no Universo.

O sistema de classificação inicial de Hubble evoluiu com o tempo e novas propostas surgiram. O sistema proposto pelo astrônomo francês Gérard de Vaucouleurs (1918-1975) em 1959 é um exemplo disso, levando em conta a presença de anéis, barras e braços espirais.

A classificação morfológica esbarra em várias dificuldades. Não existe um método analítico, objetivo e automático para classificação morfológica, apesar dos avanços desde os anos 1990. Geralmente, a classificação morfológica é feita visualmente pelo pesquisador ou então métodos indiretos são utilizados como, por exemplo, deduzir a morfologia de uma galáxia pelo estudo da variação radial do brilho, indo do centro para a borda.

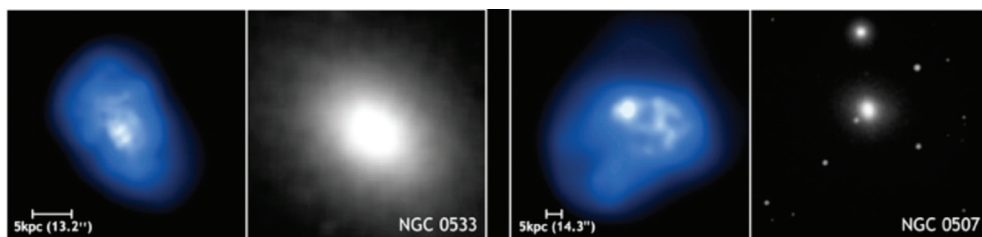
A morfologia das galáxias também depende da banda espectral em que é observada: uma galáxia que pareça, digamos, espiral Sb na banda V poderá parecer como irregular quando observada no ultravioleta. É que no ultravioleta observamos estrelas jovens de alta massa que emitem muita radiação. No infravermelho médio, observamos a emissão da poeira, aquecida pela luz das estrelas e/ou do núcleo da galáxia.



8- Galáxia E0, NGC 5198 (imagem do SDSS).



Galáxia E6, NGC 4564 (imagem do SDSS).



9- Imagens feitas em raios X (satélite Chandra, em tons de azul) e no óptico (Digital Sky Survey, DSS, em tons de cinza) de galáxias elípticas. No caso de NGC 0507 (à direita) a imagem de raios X é muito mais extensa que a imagem óptica.

Devido à diminuição do brilho superficial e do diâmetro aparente em grandes distâncias, é difícil distinguir claramente tipos morfológicos como, por exemplo, uma lenticular de uma Sa ou elíptica.

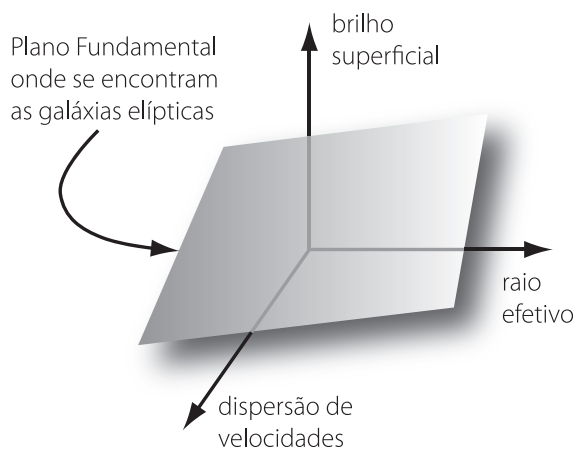
9.3.1 GALÁXIAS ELÍPTICAS

Galáxias elípticas são objetos com distribuição regular de luminosidade, sem estruturas óbvias e com população estelar predominantemente velha. Essas galáxias contêm pouco gás e poeira no meio interestelar. As maiores galáxias luminosas do Universo, que podem ser dez ou mais vezes luminosas que a Via Láctea, são elípticas. Em contraposição, muitas das galáxias anãs também são elípticas.

O achatamento observado, principalmente nas elípticas de maior massa, não é devido à sua rotação, mas sim à anisotropia da distribuição de velocidade das estrelas que as integram: na direção do eixo maior as estrelas se movem com maior velocidade (em média) que ao longo do eixo menor. As estrelas em uma grande galáxia elíptica se movem em direções aleatórias, situação muito diferente das galáxias espirais, onde as estrelas do disco se movem principalmente de maneira ordenada ao redor do centro galáctico.

Existem galáxias elípticas quase tão pequenas quanto os maiores aglomerados globulares da Via Láctea, com galáxias elípticas mais de dez vezes maiores que a nossa galáxia. A massa das galáxias elípticas é deduzida a partir de observações do movimento das estrelas, medido pelo efeito Doppler de linhas espectrais. Para as maiores galáxias, com mais de um trilhão de vezes a massa do Sol, observações da emissão de raios X proveniente do gás muito quente (aproximadamente um milhão de graus) distribuído em um halo em torno da galáxia, permitem avaliar a sua massa.

As galáxias elípticas apresentam em geral uma população estelar velha. Para a grande maioria, o último evento importante de formação estelar se deu há mais de dez bilhões de anos. Isto é o



10- Plano fundamental das galáxias elípticas.

que dá o tom avermelhado nestas galáxias quando temos uma imagem feita em cores verdadeiras (isto é, as cores que veríamos).

As galáxias elípticas apresentam certas relações entre seus parâmetros fundamentais – que caracterizam sua luminosidade, a velocidade das estrelas, como seu brilho varia do centro para a borda da galáxia – chamadas relações de escala. Essas relações, além de úteis para determinação da distância de galáxias elípticas, dão importantes pistas sobre os processos de formação e evolução galácticos.

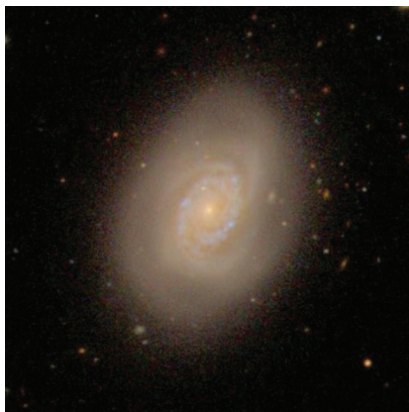
Os astrônomos norte-americanos Sandra Faber e Robert Jackson descobriram em 1976 que a luminosidade total das galáxias elípticas se correlaciona com a dispersão central (centro da galáxia) de velocidade, seguindo uma relação em que a luminosidade é proporcional à velocidade típica das estrelas na galáxia elevada à quarta potência. Essa é uma relação amplamente utilizada na determinação de distâncias uma vez que a medida da dispersão de velocidades não depende da distância do objeto.

Outra relação importante é a chamada relação proposta pelo astrônomo norte-americano John Kormendy entre o raio efetivo (o raio dentro do qual observamos a metade da luminosidade total da galáxia) e o brilho superficial. A relação dita de Kormendy é, na realidade, a projeção de uma relação mais importante conhecida como Plano Fundamental das Galáxias Elípticas, descoberta independentemente em 1987 por dois grupos de astrônomos. Quando definimos um espaço onde as coordenadas são o raio efetivo, o brilho superficial médio e a dispersão de velocidades central, as galáxias elípticas não preenchem todo o espaço, mas estão confinadas em uma fina superfície, o Plano Fundamental. A figura 10 ilustra o Plano Fundamental das galáxias elípticas.

Esta relação é consequência destas galáxias estarem em equilíbrio dinâmico e ela nos dá informações sobre a variação da quantidade de matéria escura nestes objetos.

9.3.2 GALÁXIAS ESPIRAIS

Galáxias espirais, como o nome sugere, têm grande parte de sua luminosidade distribuída segundo uma forma espiral, como braços saindo da região central. A Via Láctea, como a galáxia de Andrômeda, são exemplos de espirais. Em linhas gerais, as galáxias espirais têm parte da matéria, principalmente estrelas e gás e poeira, distribuída na forma de um disco achatado, onde se encontram os



NGC 4580, espiral de tipo Sa



NGC 4185, espiral de tipo Sb



NGC 3180, Espiral de tipo Sc



NGC 4565, Espiral Sb, vista de perfil



NGC 4440, Espiral barrada de tipo SBa



M 95, Espiral barrada de tipo SBb

12- Tipos morfológicos de galáxias.

braços espirais. Além disso, existem duas componentes esferoidais superpostas ao disco: um bojo central relativamente denso e um halo extenso, cujos centros coincidem com o centro do disco.

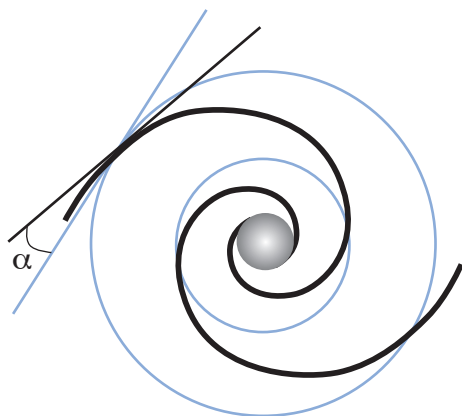
Estima-se que cerca de um terço das galáxias espirais têm uma barra bem visível que passa pela região central. A barra é uma estrutura composta do mesmo material do disco (principalmente estrelas e gás) que cruza o bojo da galáxia. Tem esse nome devido a sua aparência vista de face, parecendo uma barra no meio da galáxia. Nas galáxias vistas de perfil é mais difícil detectar uma barra, mas podemos deduzir sua presença quando a forma do bojo lembra um amendoim.

Os braços podem iniciar no bojo ou nas extremidades da barra; em galáxias que têm distribuição em forma de anel nas regiões centrais, os braços aparecem a partir desse anel. A luminosidade das galáxias espirais está na faixa entre 100 milhões e 100 bilhões de vezes a luminosidade solar.

As galáxias espirais são subdivididas em quatro tipos (a, b, c, d) e tipos intermediários como ab, bc, cd. Uma forma de determinar o tipo da galáxia espiral é medir a razão de luminosidade do bojo sobre a luminosidade do disco. Esta quantidade chamada “razão bojo/disco” diminui das Sa para as Sd:

$$Sa > 0,50 ; Sb \approx 0,45 ; Sbc \approx 0,32 ; Sc \approx 0,15 ; Sd \approx 0,10$$

Em outras palavras, em uma galáxia Sd o bojo tem apenas 10% da luminosidade do disco enquanto que em uma Sa este número atinge 50% ou mais.



13- Como é medido o ângulo de abertura dos braços espirais de uma galáxia. Este ângulo pode, em princípio, ser pedido em qualquer ponto do braço.



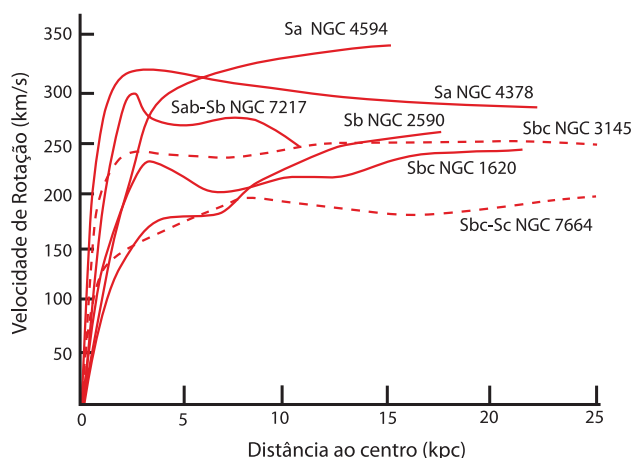
14- Exemplos de galáxias Grand Design e Flocculenta.

Outra forma de classificar as espirais é medindo o ângulo de abertura dos braços espirais. Este ângulo é formado pelo braço da galáxia e um círculo que passa a mesma distância radial, como mostra a figura 13.

O ângulo de abertura aumenta ao longo da sequência de Hubble: $Sa \approx 7^\circ$, $Sb \approx 13^\circ$, $Sc \approx 17^\circ$, aproximadamente.

Os braços das galáxias espirais podem ter um desenho muito bem definido e simétrico. As galáxias que exibem braços assim são chamadas *Grand Design*. Apenas cerca de 10% das espirais são *Grand Design*. Em contraposição, existem galáxias com braços mal definidos, chamadas flocculentas. Os casos intermediários são de galáxias com braços múltiplos ou que se bifurcam.

Como observado no capítulo anterior, os braços espirais em galáxias são perturbações que se propagam no disco galáctico mais ou menos como ondas que se propagam no mar. Os braços mais bem definidos devem ser resultado de perturbações mais intensas, que fornecem energia para os braços. De fato, as galáxias *Grand Design* apresentam uma forte tendência a estar próximas de outra galáxia (em geral menor) que seria a responsável pela perturbação e formação de braços bem definidos.



15- Curva de rotação para diversas galáxias. Note que a velocidade aumenta rapidamente próximo do centro (distância ao centro pequena) e, depois, as curvas se mantêm mais ou menos planas.

9.4 CURVAS DE ROTAÇÃO

Galáxias espirais têm uma rotação importante, com praticamente todas as estrelas do disco girando na mesma direção. O Sol, por exemplo, orbita o centro Galáctico a cerca de 200 km/s, completando uma volta em aproximadamente 250 milhões de anos.

Mas galáxias não giram como um disco de DVD, isto é, como um corpo rígido. O disco galáctico tem uma rotação chamada diferencial: a distâncias variadas do centro o tempo que uma estrela leva para completar uma volta completa é diferente. O gráfico que relaciona a posição de uma estrela e sua velocidade de rotação em torno do centro galáctico é chamado Curva de Rotação (figura 15).

As curvas de rotação permitem aos astrônomos determinar a massa de uma galáxia. Por exemplo, nas partes externas das galáxias, onde a curva de rotação é plana, indica que a massa aumenta com a distância ao centro de forma linear.

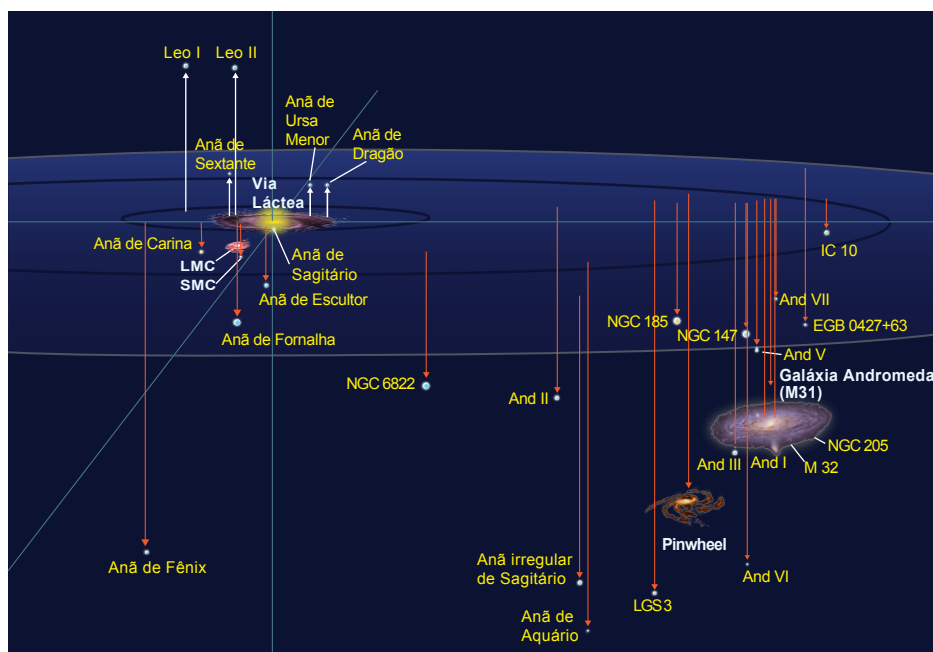
Por outro lado, como já visto, a luminosidade diminui para fora das galáxias. E aqui aparece uma contradição: enquanto a quantidade de massa aumenta, a quantidade de estrelas diminui. Isso indica que existe uma grande quantidade de matéria nas galáxias que não podemos observar, a matéria escura. Na realidade, a maior parte da massa das galáxias está nessa forma misteriosa e ainda desconhecida de matéria escura.

9.5 DISTRIBUIÇÃO EM GRANDE ESCALA

A distribuição de matéria no Universo é uma questão posta desde a Antiguidade, pois está diretamente relacionada às questões cosmológicas: como surgiu o Universo, como se dá sua evolução, onde estamos.

Em 1931, o engenheiro norte-americano Karl Jansky (1905-1950) abriu uma nova janela com a descoberta de emissão rádio extragaláctica. Dois anos mais tarde, o astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1974) deduziu a existência da matéria em grande quantidade no aglomerado de galáxias na constelação de Coma Berenice.

No final dos anos 1970, foi descoberta grande quantidade de matéria escura nos halos de galáxias espirais. Essa descoberta mostra que a matéria “convencional” é uma pequena fração de toda a maté-



16- Representação tridimensional do Grupo Local de galáxias. Note como o Grupo Local tem duas concentrações de galáxias, uma em volta de M31 e outra em torno da nossa galáxia.

ria do Universo. Em 1986 foi feito o primeiro mapa tridimensional de uma grande fatia do Universo, mostrando que em grande escala as galáxias se organizam em filamentos com pelo menos dezenas de milhões de parsecs.

A observação de supernovas extragalácticas permitiu, em 1998, constatar que o Universo está em expansão acelerada. Essa aceleração é interpretada como efeito da pressão negativa da também desconhecida energia escura, responsável por cerca de 70% de toda a energia do Universo. Esse assunto será discutido no próximo capítulo.

O estudo da distribuição de matéria no Universo se dá principalmente pela análise da distribuição de galáxias em grande escala. Mais recentemente, a partir da década de 1990, outras técnicas surgiram, baseadas em outros tipos de observação ou objetos: as irregularidades da radiação cósmica de fundo, lentes gravitacionais, procura de grupos de galáxias usando raios X ou micro-ondas etc.

As galáxias tendem a se agrupar e podemos supor que toda a matéria do universo (incluindo a matéria escura) se comporte assim. Se as galáxias forem um bom traçador de toda a matéria, podemos estudar a estrutura do Universo pelas observações de galáxias.

9.5.1 DISTRIBUIÇÃO DE GALÁXIAS: GRUPO LOCAL

A maioria das galáxias no Universo vive em grupos e a Via Láctea é parte dessa maioria. A Via Láctea se encontra em um modesto grupo que conta com cerca de 40 galáxias conhecidas, em uma região com 8 milhões de anos-luz de diâmetro.

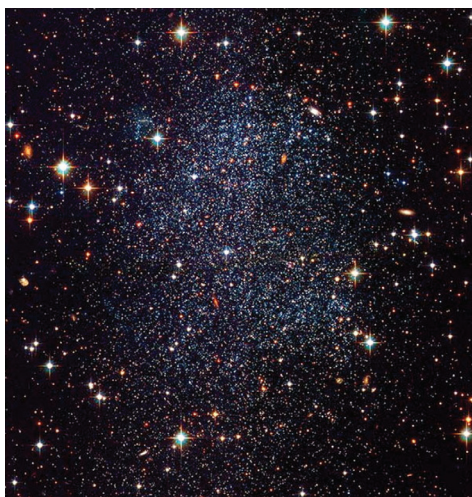
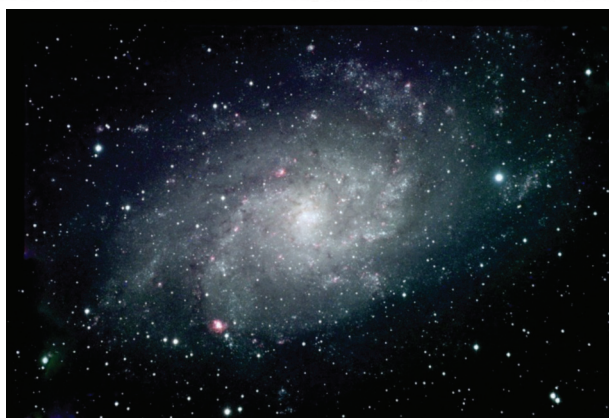
O Grupo Local contém duas galáxias espirais gigantes, a Via Láctea e a galáxia de Andrômeda, também conhecida como M31 (objeto de número 31 no catálogo de Charles Messier). Elas são as maiores galáxias do Grupo Local. Em terceiro lugar vem a galáxia M33, galáxia do Triângulo também conhecida como Catavento devido a aparência de seus braços.

Praticamente toda a massa do Grupo Local, estimada em cerca de 2×10^{12} massas solares, está concentrada nestas duas grandes espirais. M33 tem menos de um décimo da massa da Via Láctea e se somarmos a massa de todas as outras 38 galáxias conhecidas não chegamos nem a 10% da massa do Grupo Local.

O Grupo Local se divide em dois pequenos subgrupos: o da Via Láctea e o de M31. A maioria das galáxias está ligada a uma ou outra espiral gigante. A galáxia espiral do triângulo é satélite de M31.



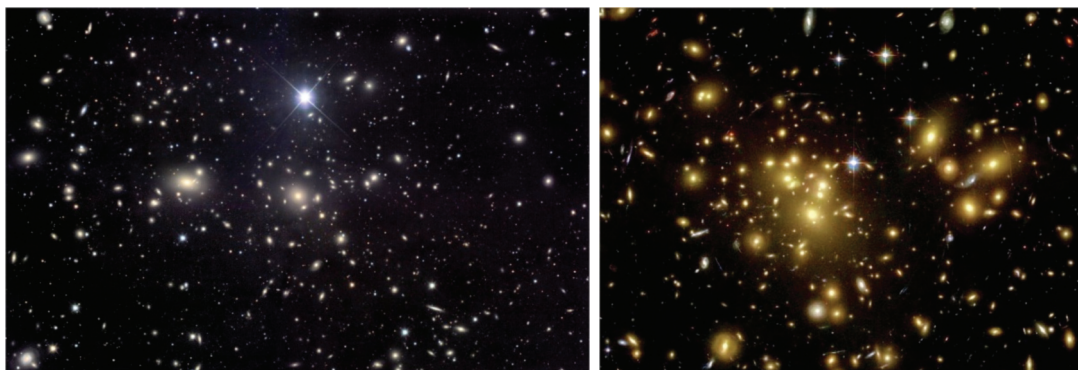
15- Esquerda: Galáxia de Andrômeda. Uma imagem da Lua foi colocada ao lado de M31 para dar uma ideia do seu tamanho aparente no céu. A olho nu, em uma noite muito favorável, pode-se observar a parte central do bojo como uma fraca nebulosidade no céu. Direita: galáxia do triângulo, M33.



16- Esquerda: Imagem do telescópio Espacial Hubble da galáxia anã irregular de Sagitário (SagDIG), localizada a 3,5 milhões de anos-luz, descoberta em 1977. Direita: Galáxia anã de Cetus (constelação da Baleia), a 2,8 milhões de anos-luz, descoberta em 1999.



17- Esquerda: Imagem do HST do Sexteto de Seyfert. Apesar do nome, há apenas quatro galáxias brilhantes neste grupo compacto, sendo que uma está longe, atrás do grupo e outra na realidade é matéria arrancada devido a uma colisão de galáxias. Direita: imagem em cores “verdadeiras” no infravermelho feita pelo satélite Spitzer do grupo Quinteto de Stefan. Este grupo compacto tem quatro galáxias, a quinta é uma galáxia que está longe, na frente do grupo.

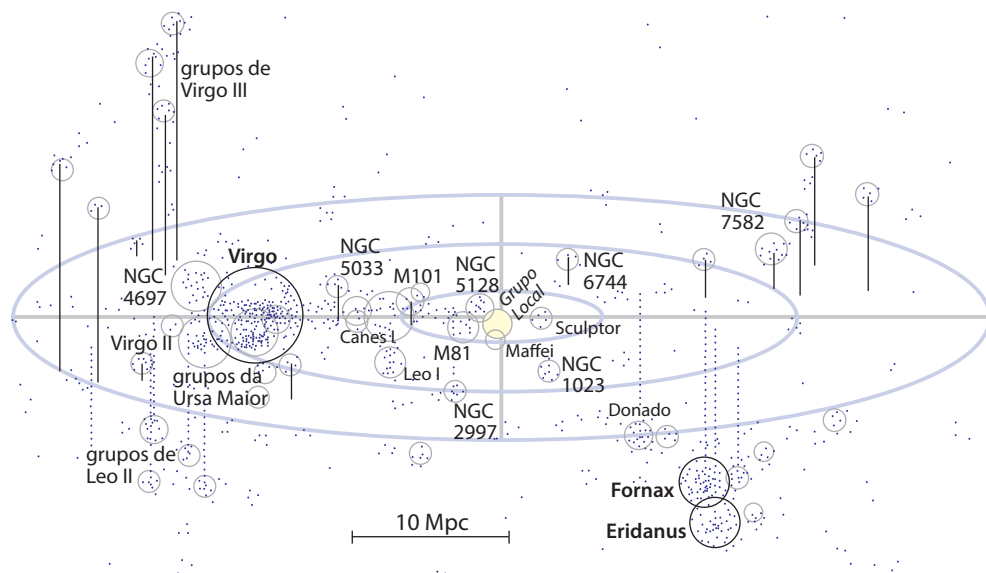


18- Esquerda: Aglomerado de Coma, a cerca de 330 milhões de anos-luz, contém milhares de galáxias brilhantes. No centro vemos duas galáxias elípticas gigantes, cada uma delas mais de dez vezes mais luminosa que a Via Láctea. A estrela brilhante que aparece nesta imagem é da nossa galáxia. Direita: aglomerado muito rico Abell 1689, a 2,5 bilhões de anos-luz. Este é um dos aglomerados de maior massa conhecido.

O número de galáxias descobertas no Grupo Local tem aumentado desde a primeira década do século 21. Até 1944, apenas 11 galáxias eram conhecidas e, desde 1999, outras dez foram encontradas. Possivelmente ainda existem muito mais galáxias anãs discretamente passeando pelo Grupo Local. Algumas galáxias do Grupo Local, especialmente as que estão sendo descobertas nos últimos anos, são tão tênues que mal é possível distingui-las das estrelas da Via Láctea.

9.5.2 GRUPOS COMPACTOS

Nem todos os grupos são como o Grupo Local. Alguns são extremamente compactos, onde as galáxias quase se acotovelam. Esses grupos compactos são relativamente raros, mas muito interessantes pois fenômenos ligados a interações fortes entre as galáxias podem ser observados.



19- O Superaglomerado local, com o Grupo Local no centro e o aglomerado de Virgo a esquerda.

9.5.3 AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

Aglomerados de galáxias são as maiores estruturas em (ou quase) equilíbrio no Universo. Dentro de um volume com diâmetro de 20 milhões de anos-luz podemos encontrar milhares de galáxias. A massa total de um aglomerado varia entre 10^{14} e 10^{15} massas solares. Esses interessantes objetos são relativamente raros, apenas cerca de 7% das galáxias pertencem a aglomerados.

Dois aglomerados de galáxias foram percebidos ainda no século 18: o aglomerado de Virgem, pelo astrônomo francês Charles Messier (1730-1817) e o Aglomerado de Coma por William Herschel. Isso não ocorreu por acaso, pois o aglomerado de Virgem é o mais próximo, a 55 milhões de anos-luz, enquanto o de Coma é o mais rico dentro do volume que chamamos de universo local (volume encerrado em um raio de um bilhão de anos-luz). Entre 1958 e 1989, o astrônomo norte-americano George Abell (1927-1983) e colaboradores fizeram um catálogo com mais de quatro mil aglomerados ricos de galáxias, que ainda hoje é muito utilizado.

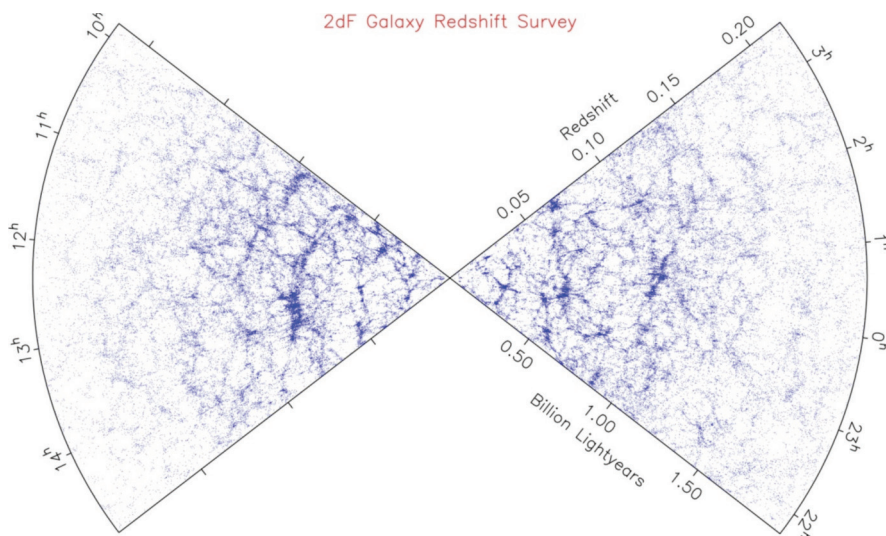
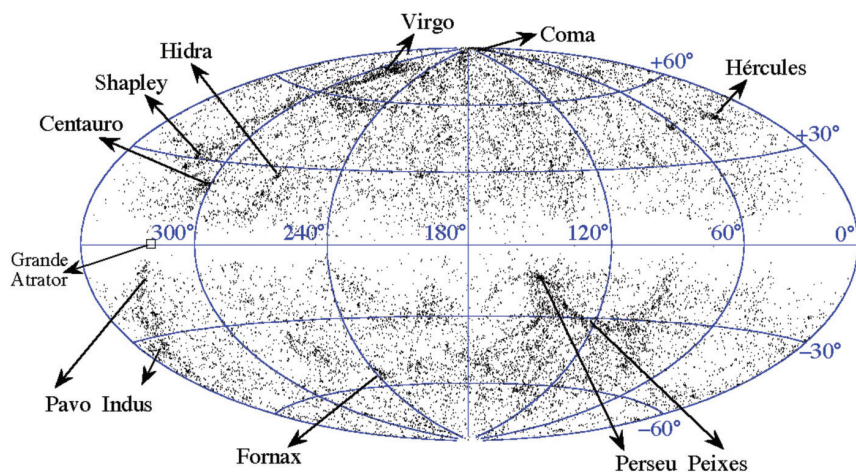
Aglomerados de galáxias reúnem três componentes básicas. A mais conhecida e, historicamente a primeira observada, são as próprias galáxias do aglomerado. Ao contrário de ambientes mais rarefeitos, fora dos grupos, a maioria das galáxias em aglomerados são elípticas e lenticulares, ou seja, galáxias avermelhadas que não produzem mais estrelas. A soma da massa de todas as galáxias não passa de 2 ou 3% da massa total do aglomerado.

Há mais coisas em aglomerados que nossos olhos podem ver. Na final da década de 1960 foi descoberta uma grande quantidade de gás entre as galáxias dos aglomerados. Esse gás, quente e muito rarefeito, emite raios X. Todo este gás intra-aglomerado é responsável por 12 a 15% da massa total dos aglomerados.

A temperatura do gás intra-aglomerado é superior à do núcleo do Sol, variando tipicamente entre 20 a 120 milhões de graus. Já a densidade do gás é da ordem de um átomo por litro. Para se ter uma ideia, a atmosfera na cidade de São Paulo (750 metros acima do nível do mar) tem 2×1.022 moléculas por litro, e entre as estrelas, na vizinhança solar, a densidade varia entre 10.000 e 100.000 átomos por litro.

Se toda a massa da matéria “normal” em aglomerados for somada, isto é a matéria composta por prótons e nêutrons, notamos que a conta não fecha e falta ainda uma terceira componente. Essa com-

20- Distribuição no céu das 23 mil galáxias mais brilhantes. Podemos notar a inhomogeneidade da distribuição. As estruturas mais proeminentes estão marcadas na figura. Na faixa horizontal, que corta a esfera celeste em duas metades, praticamente não há galáxias observadas. Essa faixa corresponde à região obscurecida pela Via Láctea, que dificulta muito a visão de objetos extragalácticos.



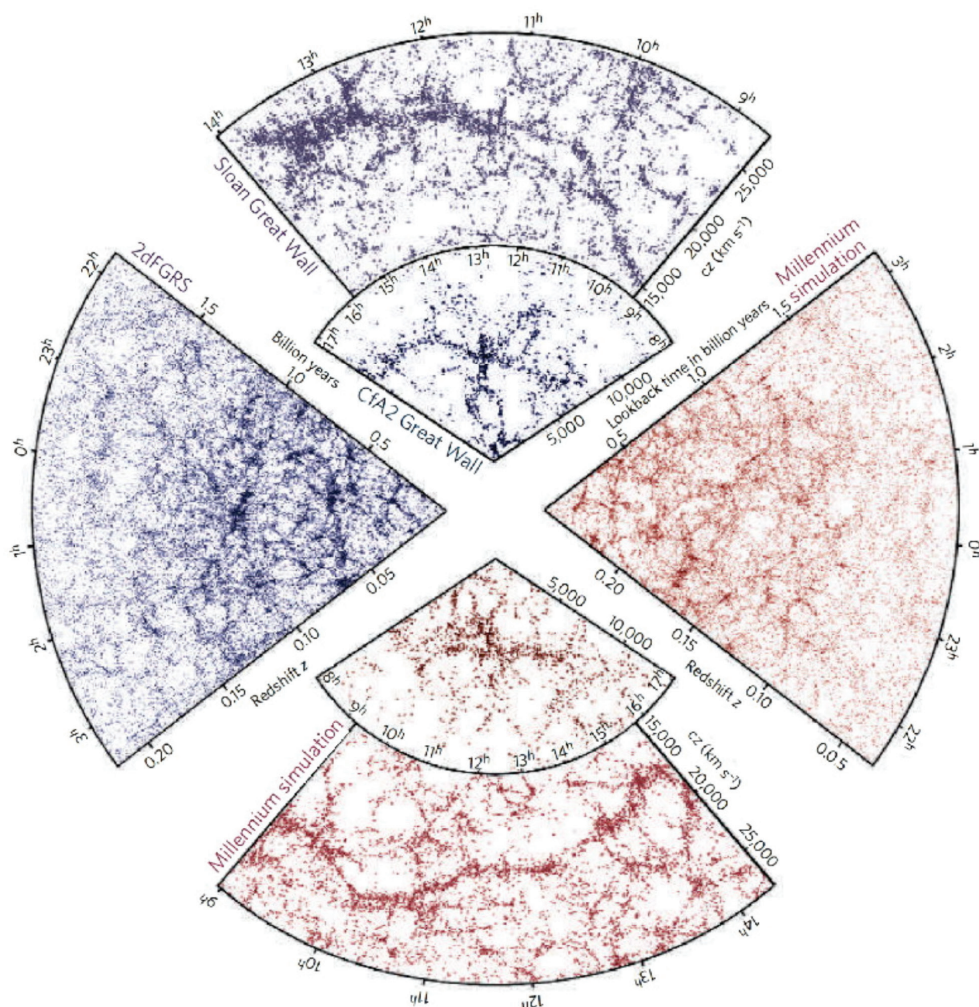
21- Distribuição de mais de 100 mil galáxias em duas fatias opostas do universo. Nós estamos no vértice central dos dois cones (Fonte: Programa Anglo-Australiano Two-Degree Field Galaxy Redshift).

ponente invisível, ou a “massa faltante” como já foi chamada no passado, foi detectada por Fritz Zwicky nos anos 1930. Ele e, posteriormente, outros astrônomos, chegaram à conclusão de que havia muito mais massa na forma de matéria escura, responsável por cerca de 85% da matéria do aglomerado.

9.5.4 SUPERAGLOMERADOS

Aglomerados de galáxias podem perturbar o movimento das galáxias e dos grupos de galáxias nas suas proximidades. O aglomerado de Virgem, por exemplo, atrai o Grupo Local. Por essa razão dizemos que o nosso grupo de galáxias é parte do Superaglomerado Local, dominado pelo aglomerado de Virgem e composto por várias dezenas de pequenos grupos, semelhantes ao Grupo Local.

Os superaglomerados são objetos em formação, ainda longe de uma situação de equilíbrio. Tipicamente os superaglomerados têm dimensão de 100 milhões de anos-luz e massas entre 10^{16} e 10^{17} massas solares. Alguns dos superaglomerados mais próximos são o de Perseus-Peixes, Shapley e Hidra-Centauro.



22- Comparação entre a distribuição observada (gráficos com pontos azuis) e prevista (gráficos com pontos vermelhos) de galáxias no universo. Em escalas superiores a 30 milhões de anos-luz, a semelhança destas distribuições é notável.

9.5.5 ESTRUTURA EM GRANDE ESCALA

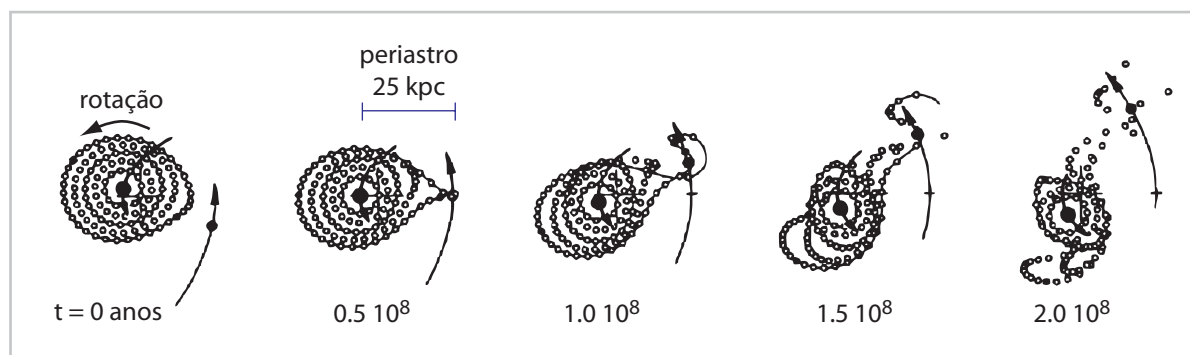
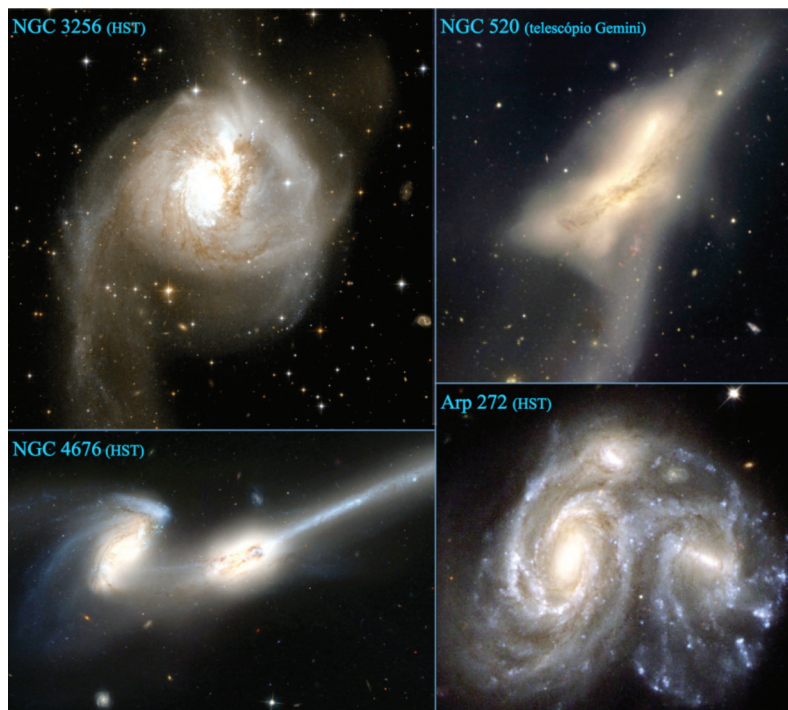
A matéria não se distribui de forma homogênea em todas as escalas. Quando observamos o universo local, em um raio de um bilhão de anos-luz, notamos que as galáxias tendem a se agrupar. Em escalas menores estão os grupos e aglomerados de galáxias e, em escalas maiores, os superaglomerados e os filamentos cósmicos, também chamados de “muros”. Os maiores muros conhecidos têm até 700 milhões de anos-luz de extensão. Mapas como o mostrado na figura 30 nos dão uma ideia da distribuição de galáxias projetada no céu, isto é, a distribuição bidimensional.

Um grande progresso para a compreensão da distribuição da matéria no Universo ocorreu quando, a partir de meados da década de 1980, o avanço tecnológico permitiu medir a distância de um grande número de galáxias simultaneamente. Com isso foi possível fazer uma espécie de tomografia do Universo e estudar a distribuição de matéria em três dimensões.

A estrutura do Universo é semelhante a uma esponja com grandes furos ou a um emaranhado de teias. Entre os grandes filamentos cósmicos traçados pelas galáxias existem regiões enormes, os “vazios cósmicos”, com centenas de milhões de anos-luz e praticamente sem galáxias.

A distribuição de matéria no Universo se compara bem com a distribuição prevista a partir de modelos de evolução cosmológica, calculada com a ajuda de simulações numéricas. Nessas simula-

23- Exemplos de galáxias com aparência morfológica peculiar. Estas galáxias, especialmente se observadas por instrumentos menos potentes, poderiam ser classificadas como galáxias irregulares. Nestas imagens, feitas com o telescópio espacial ou com o telescópio Gemini de 8m de diâmetro, podemos notar que cada objeto se trata do encontro de duas galáxias.



24- Resultado da simulação de um encontro entre duas galáxias feita pelos irmãos Toomre.

ções o Universo é representado por uma grande quantidade de pontos – que podem ultrapassar 10 bilhões de partículas – e a trajetória de cada ponto é computada ao longo da história de 14 bilhões de anos da idade cósmica. Esses cálculos levam meses para serem elaborados nos mais potentes computadores e o resultado é semelhante às observações, indicando que os modelos utilizados parecem descrever bem a Natureza.

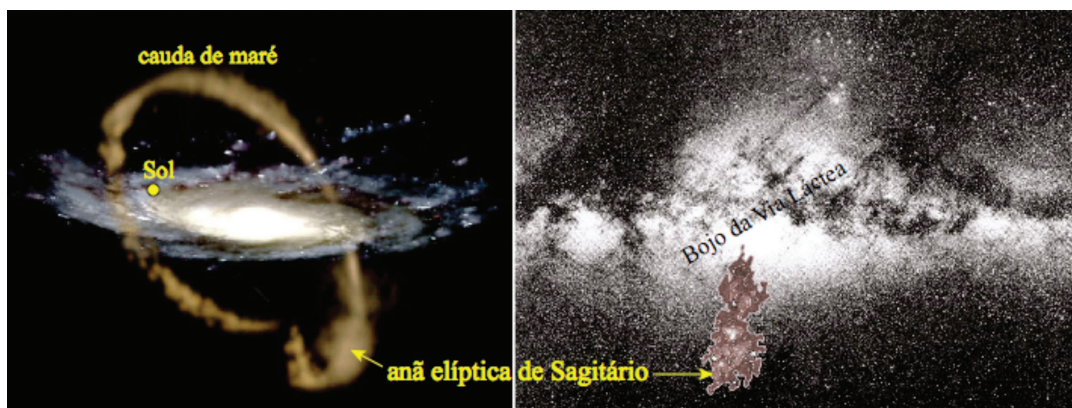
9.6 GALÁXIAS PECULIARES: COLISÕES GALÁCTICAS

A maioria das galáxias brilhantes apresenta morfologia relativamente regular e apenas uma pequena fração exibe formas peculiares, não se encaixando na classificação morfológica de Hubble.

A partir dos anos 1970 ficou claro que as galáxias não são animais cósmicos que vivem tranquilamente, separadas uma das outras. Ao contrário, pelo fato de a maioria das galáxias permanecerem em associações (pares, grupos, aglomerados), as colisões ou passagens próximas de uma galáxia por outra não são raras.



25- Esquerda: colisão das galáxias NGC 4038 e 4039, conhecida como Antena. As “antenas” são também chamadas “caudas de maré”, pois são produzidas por efeito de maré quando duas galáxias se aproximam uma da outra. Direita: Galáxia “Roda de Carruagem” e junto com duas galáxias anãs. A morfologia desta galáxia é explicada por uma colisão frontal de uma galáxia espiral com uma galáxia anã.



26- Esquerda: simulação da colisão entre o disco da Via Láctea e a galáxia anã de Sagitário (SagDEG). Direita: posição das estrelas que pertencem à SagDEG. A partir do nosso ponto de vista, esta galáxia anã se encontra atrás do bojo da Via Láctea.

Em 1972, os irmãos Toomre (Alar e Juri) mostraram que a passagem de uma galáxia próxima de outra, sem haver colisão propriamente dita, resulta na deformação de ambas.

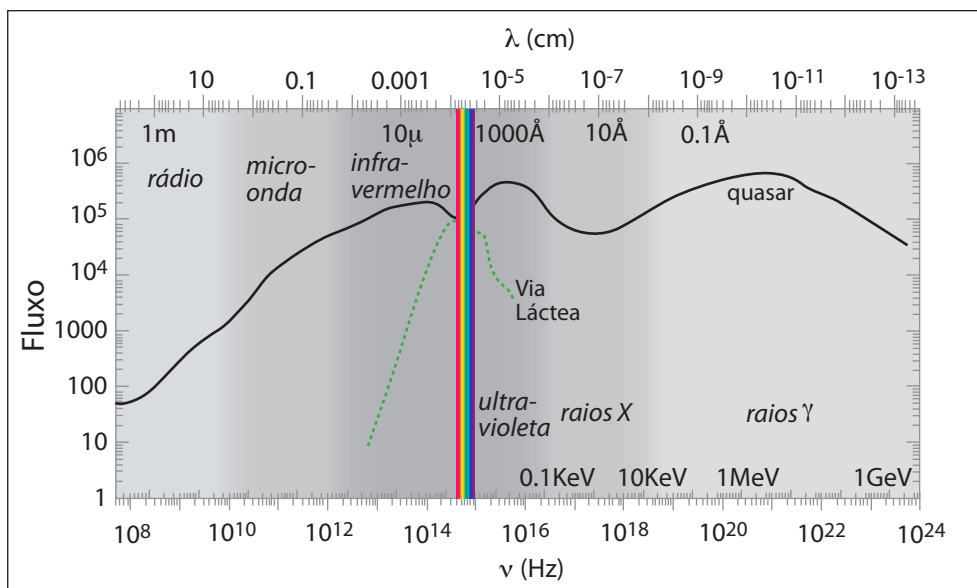
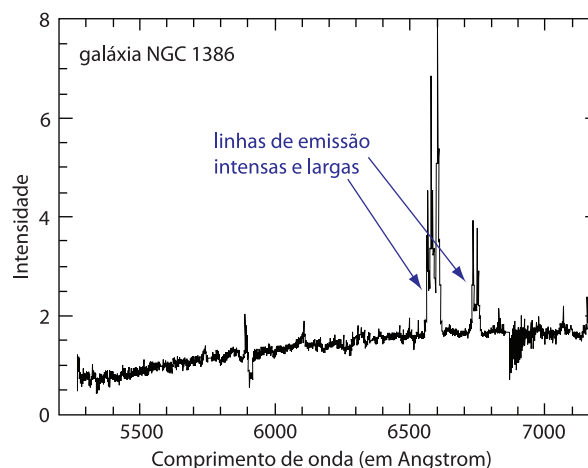
Com o tempo, o avanço dos computadores e das técnicas de simulação numérica, ficou claro que esses encontros entre galáxias têm um papel importante na moldagem da forma que observamos nesses objetos. Também foi constatado que as colisões de galáxias ricas em gás, como as espirais, produzem um surto de formação estelar, o que dá um tom mais azulado às galáxias.

A Via Láctea também sofre colisões, mas nos últimos bilhões de anos nenhuma delas foi tão espetacular como as vistas na figura 26. Descoberta em 1994, alguns anos depois foi constatado que a galáxia elíptica anã da constelação do Sagitário estaria sendo “canibalizada” pela Via Láctea. Este é um processo que leva centenas de milhões de anos e resulta de várias colisões sucessivas. Posteriormente, a galáxia anã é completamente desintegrada e suas estrelas, gás e poeira se misturam com o material da Via Láctea.

As Nuvens de Magalhães, galáxias satélites que orbitam a Via Láctea, também serão “canibalizadas” em alguns bilhões de anos.

A colisão mais espetacular da Via Láctea deve ocorrer em 3 ou 4 bilhões de anos em um encontro quase frontal com a galáxia de Andrômeda. Atualmente, a galáxia de Andrômeda se dirige em direção à Via Láctea à uma velocidade de 120 km/s (432 mil km/h ou 0,4 anos-luz por milênio) e ela ainda tem que percorrer mais de 2,2 milhões de anos-luz. O resultado dessa colisão será, após centenas de milhões de anos, a formação de uma galáxia elíptica gigante.

27- Espectro de uma galáxia peculiar, com atividade no núcleo revelada pelas linhas de emissão intensas.



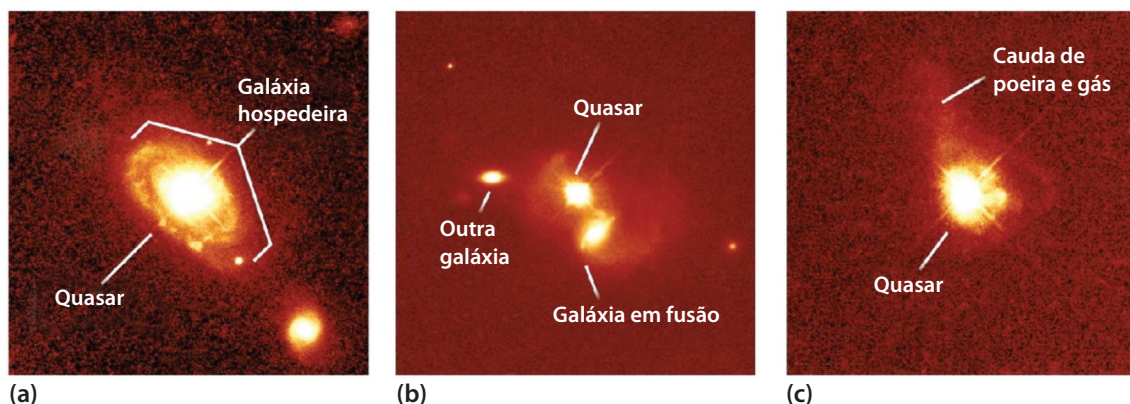
28- Comparação entre a distribuição de energia em função do comprimento de onda de um quasar e da Via Láctea.

9.6.1 GALÁXIAS ATIVAS, RADIOGALÁXIAS E QUASARES

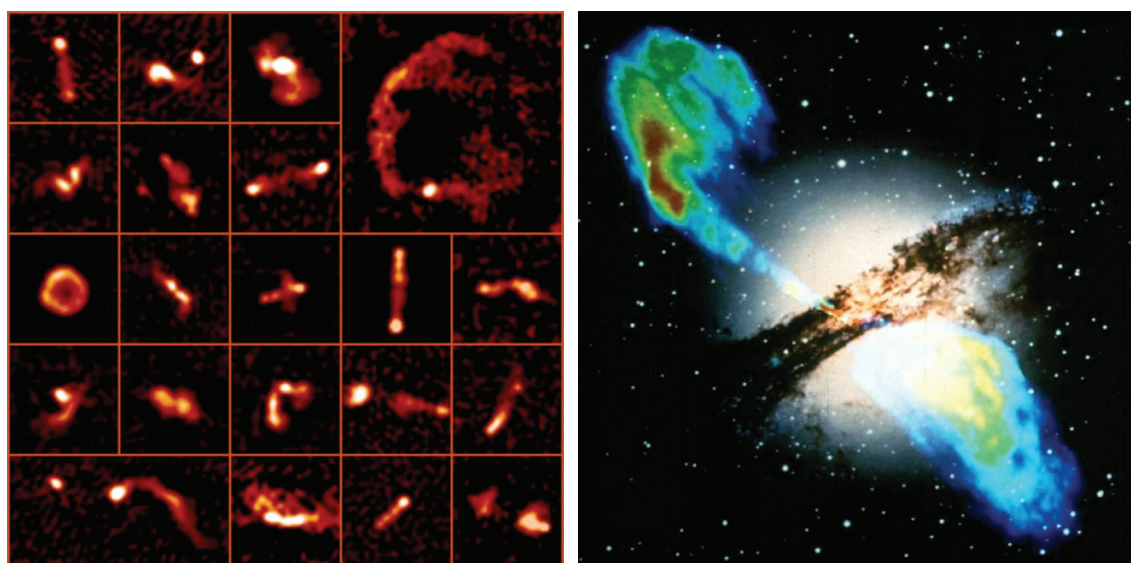
No início do século 20 alguns astrônomos notaram que o espectro de certas nebulosas espirais é peculiar, apresentando linhas de emissão intensas e largas. Essas nebulosas foram reconhecidas mais tarde como galáxias, mas a peculiaridade do espectro permaneceu intrigante. A aparência dessas galáxias parecia normal, exceto por um núcleo um pouco mais brilhante que a média. Em 1943, Carl K. Seyfert astrônomo norte-americano (1911-1960) voltou a se interessar por galáxias peculiares com linhas de emissão fortes e largas – esses objetos foram reconhecidos, posteriormente, como galáxias de núcleo ativo chamadas “galáxias Seyfert”.

As galáxias Seyfert são identificadas e classificadas pelo seu espectro óptico: quando as linhas do espectro de hidrogênio são muito largas, são chamadas de Tipo I; quando essas linhas são mais estreitas são de Tipo II. Nos anos 1980 foi descoberto que essa dicotomia está ligada à geometria e estrutura destes objetos.

Em 1962 foi descoberto o primeiro quasar (do inglês *quasi-stellar radio source*, ou fonte rádio quase-estelar), um objeto distante, compacto e extremamente energético. Nas imagens ópticas (visíveis), o quasar parece uma estrela qualquer e, por essa razão, foi chamado de “radioestrela” antes do nome quasar se consolidar.



29- Imagens de quasares feitas com o telescópio espacial Hubble (HST), mostrando a galáxia hospedeira. Em vários casos constatou-se que a galáxia com um quasar interagia com uma vizinha. Apenas com imagens de ótima qualidade pode-se distinguir a galáxia de seu quasar, caso contrário o quasar literalmente ofusca a galáxia.



30- Esquerda: seleção de algumas radiogaláxias observadas pelo VLA. Observamos uma fauna de formas muito variadas. Direita: a radiogaláxia Centauro A (NGC 5128) está praticamente no nosso quintal cósmico, a cerca de 12 milhões de anos-luz. Nesta imagem composta está superposta uma imagem colorida da emissão rádio sobre uma imagem óptica. A faixa escura que corta a galáxia pela metade é devida à poeira.

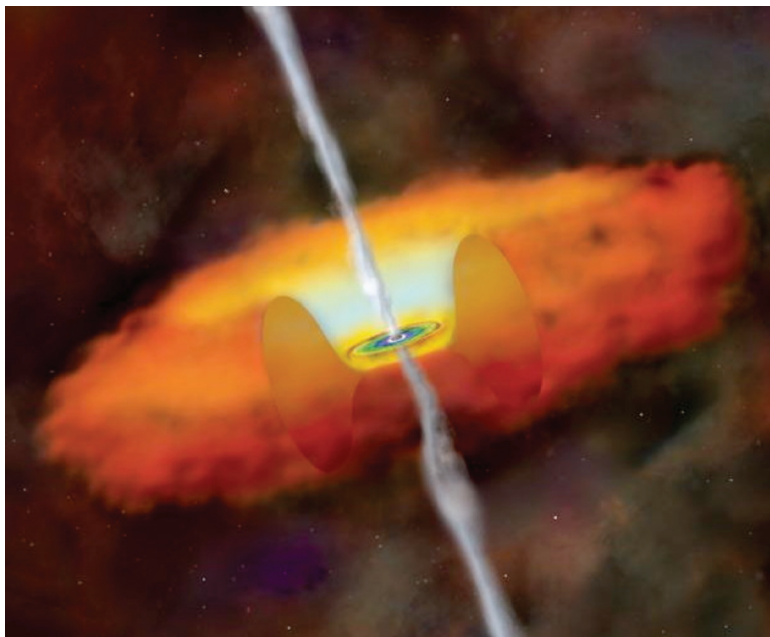
Os quasares chamaram muito a atenção dos astrônomos por duas razões. A primeira é pela aparência estelar: um simples ponto no céu. A segunda, por serem objetos muito distantes. A distância em si era curiosa, mas não necessariamente surpreendente. Mas, levando em conta o brilho aparente dos quasares a essas distâncias enormes concluiu-se que esses objetos são as mais poderosas fontes de energia do Universo. Um quasar emite tanta energia quanto uma galáxia como a nossa, ou seja, como muitos bilhões de sóis.

Mas não é apenas na luz visível que os quasares são brilhantes. Ao contrário, eles brilham mais em outros comprimentos de onda como infravermelho e ultravioleta.

Com o telescópio espacial Hubble foi possível obter imagens detalhadas de quasares e se constatou que essas criaturas cósmicas vivem no núcleo de galáxias. Os quasares são, na realidade, semelhante às galáxias estudadas por Seyfert em 1943, mas em versão muito mais poderosa.

Em contrapartida, depois dos anos 1930, sobretudo após a Segunda Guerra Mundial, a radioastronomia floresceu e permitiu a descoberta de uma nova classe de objetos: as radiogaláxias. Elas são objetos muito extensos com uma intensa emissão em ondas de rádio (daí o nome). Elas

31- O modelo unificado de núcleos ativos tem os seguintes ingredientes: um buraco negro supermassivo central, um disco de acreção com matéria que gira e cai no buraco negro, um toro molecular (objeto geométrico com a mesma forma de um pneu ou uma rosquinha) com grande quantidade de poeira e moléculas. Em 10% dos casos, um jato bipolar de partículas relativísticas ejetadas de uma região próxima à superfície do buraco negro central. Essa superfície é a da esfera com raio equivalente ao Raio de Schwarzschild, que define o “horizonte de eventos” – região de onde nada pode escapar de um buraco negro, nem mesmo a luz (crédito da imagem: NASA/CXC/M. Weiss).



apresentam diversas morfologias, mas têm algo em comum: a fonte de energia da emissão rádio está no núcleo da galáxia hospedeira.

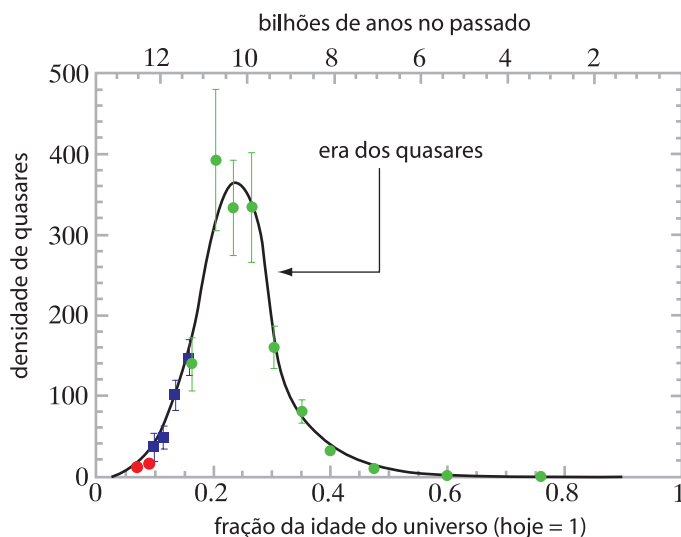
A região que produz a energia de um quasar não pode ser resolvida, mesmo com o telescópio espacial. Assim, a aparência delas continua parecida com uma estrela. Mas logo depois que foram descobertos, percebeu-se que a intensidade do brilho dessas fontes varia com o tempo, aumentando e diminuindo. O período de variação de uma fonte está relacionado a seu tamanho: quanto maior a fonte, maior o tempo necessário para ocorrer uma variação na sua luminosidade.

Assim, medindo-se o período de variação de um quasar é possível deduzir seu tamanho. Uma variação de algumas horas significa que a fonte deve ter um tamanho de algumas unidades astronômicas. Em outras palavras, um quasar emite tanta energia quanto uma galáxia inteira, mas essa energia é produzida em um volume menor que o do Sistema Solar.

O mecanismo capaz de liberar tamanha quantidade de energia é a queda de matéria em um buraco negro supermassivo. Um buraco negro de 100 milhões de massas solares alimentado por uma massa solar por ano produz 100 trilhões de vezes mais energia que o Sol e isso por centenas de milhões de anos! No fundo, a conversão de energia potencial gravitacional em radiação é mais eficiente que a produção de energia por fusão nuclear.

Galáxias de núcleo ativo, os quasares e as radiogaláxias não passam da manifestação do mesmo fenômeno, mas visto por um ângulo diferente e com intensidade intrínseca distinta. É o chamado modelo unificado de núcleos ativos de galáxias, que amadureceu durante a década de 1980. No coração desse modelo está o motor que produz a energia observada nos quasares.

Quando observamos o “motor” do núcleo ativo “por cima”, isto é, na direção da vertical do toro (pneu) molecular, temos uma visão desobstruída do disco de acreção. Neste caso, o objeto parecerá um Blasar (tipo de quasar com variabilidade de luminosidade muito intensa e rápida). Com um pouco mais de inclinação, o próprio disco de acreção obstrui um pouco a região mais próxima do buraco negro; nesta situação, o objeto nos parecerá como um quasar ou, se for menos intenso, como uma galáxia Seyfert de tipo I. Aumentando mais ainda a inclinação de observação, o toro molecular passa a impedir uma visão clara do disco de acreção; agora o objeto parecerá uma Seyfert de tipo II. Se houver emissão de partículas relativísticas do núcleo, elas irão interagir com o campo magnético e emitir ondas de rádio. Nesta condição, o objeto é visto como uma radiogaláxia (figura 30).



32- Houve uma época no passado, há cerca de dez bilhões de anos atrás, em que o número de quasares era muito maior do que hoje. Este período, que durou cerca de dois bilhões de anos, caracteriza a Era dos Quasares.

O “motor” dos quasares precisa de combustível, o material do meio interestelar que mergulha no buraco negro. Posteriormente este combustível termina, o estoque de gás disponível se esgota, então o núcleo central ativo se “apaga”. Foi descoberto nas últimas décadas que todas as galáxias brilhantes próximas da Via Láctea têm um buraco negro supermassivo central. Mas, na maioria dos casos, esse buraco negro está dormente, sem o combustível necessário para transformá-lo no agente motor de um quasar.

O “motor” pode ser religado, por exemplo, se uma galáxia com um buraco negro supermassivo canibaliza outra rica em gás. Atualmente esse processo deve ser raro, pois não observamos quasares próximos. Mas pode ter sido frequente no passado, quando os objetos estavam mais próximos entre si.

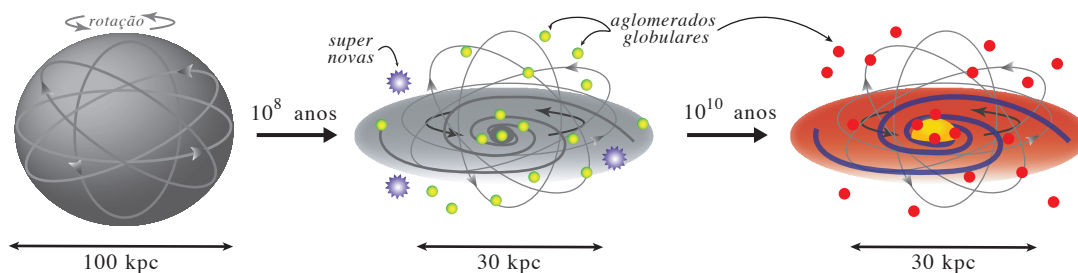
9.7 FORMAÇÃO DE GALÁXIAS

A formação de objetos no Universo, de estrelas a aglomerados de galáxias, decorre da instabilidade gravitacional. Regiões com massa acima de um valor crítico não se mantêm em equilíbrio e colapsam, isto é, toda a matéria daquela região cai em direção ao centro de massa.

Em 1962, os astrofísicos Ollin Eggen, Donald Lynden-Bell e Allan Sandage propuseram um cenário de formação para a Via Láctea, que foi aplicado às galáxias em geral: o “colapso monolítico”. Nesse cenário, as galáxias se formam a partir do colapso gravitacional de uma grande massa de gás. Durante a queda da matéria, uma parte do gás forma estrelas e aglomerados globulares. Se a massa de gás tiver alguma rotação, ela aumenta à medida que a nuvem colapsa e compõe um disco onde, gradualmente, as estrelas vão se formando ao longo do tempo.

Mas esse cenário não pode explicar algumas propriedades e observações de galáxias como, por exemplo, a quantidade de metais nos aglomerados globulares. Atualmente o cenário mais aceito de formação de galáxias é o chamado modelo hierárquico: primeiro formam-se as menores galáxias, pouco maiores que aglomerados globulares. E elas vão se fundindo para construir galáxias cada vez maiores. Essa concepção se enquadra bem às observações e previsões teóricas dos modelos cosmológicos mais aceitos.

Ainda assim, para se entender as propriedades das galáxias, incluindo a Via Láctea, além do mecanismo de formação é preciso levar em conta a evolução desses objetos. Nas últimas décadas tem



33- Modelo monolítico, onde as galáxias se formam pelo colapso de uma nuvem de gás primordial.

ficado claro que processos evolutivos lentos, chamados globalmente de “evolução secular” têm papel importante para dar a forma e aparência observada nas galáxias.

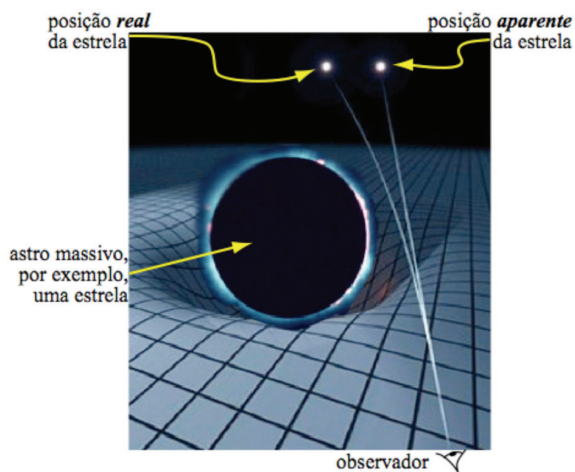
9.8 LENTES GRAVITACIONAIS

Quando lançamos uma pedra para cima, obviamente ela sobe e, depois, cai. Se lançarmos com mais força, a pedra vai mais longe antes de retornar. Se imaginarmos que poderíamos lançar a pedra de forma que ela deixasse nossas mãos com mais de 11,2 km/s (um pouco mais de 40 mil km/h), ela não cairia de volta e entraria em órbita em torno da Terra. Foi fazendo essa analogia com a luz que surgiu a primeira ideia de um buraco negro.

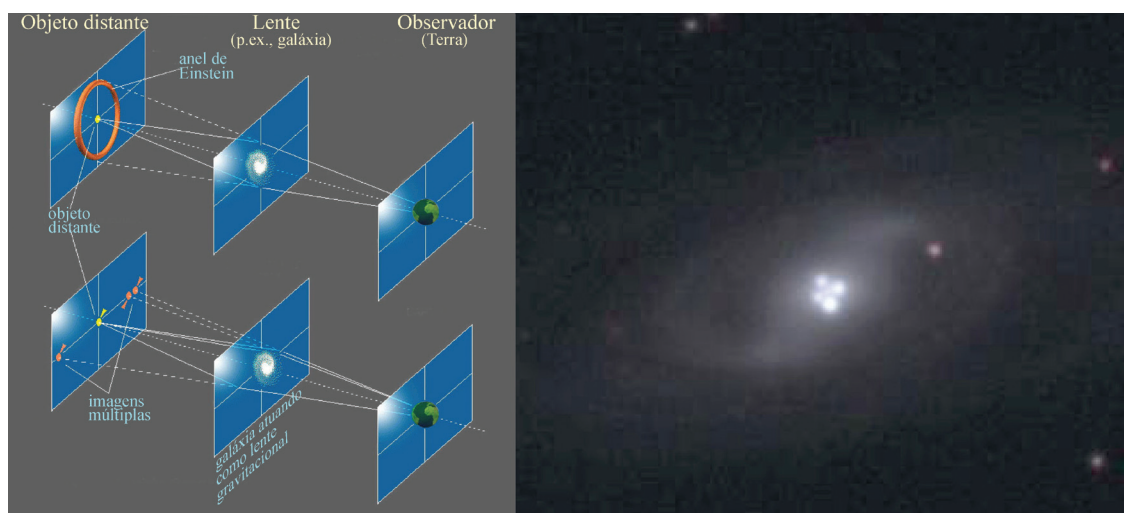
Em 1704, o próprio Isaac Newton cogitou o possível efeito da gravitação sobre a luz. A influência da gravitação sobre a luz (na verdade qualquer radiação eletromagnética como ondas de rádio ou raios X) só foi esclarecida em 1915, com a teoria da gravitação de Einstein (também chamada “teoria da relatividade geral”). Basicamente, matéria e energia deformam o espaço-tempo e isso determina a trajetória da matéria e radiação.

Espaço-tempo é o sistema de coordenadas utilizado na relatividade especial e geral de Einstein. O tempo e o espaço tridimensional são concebidos em conjunto, como uma única grandeza de quatro dimensões. Um ponto no espaço-tempo pode ser designado como um “acontecimento”. Cada acontecimento tem quatro coordenadas: três de espaço (x , y , z) e uma de tempo (t). Uma característica desse sistema de coordenadas é a impossibilidade de algo mover-se no espaço, mas não no tempo. O contrário é possível, algo que esteja em repouso no espaço sempre estará em movimento no tempo. Portanto, na geometria espaço-tempo, tudo está em movimento.

Outra característica desse sistema é a deformação que o espaço-tempo sofre na presença de massa. Quanto maior a massa, maior a deformação do espaço-tempo nas vizinhanças dela. Assim, a luz que se propaga em linha reta em um espaço curvo descreverá uma curva. Daqui brotou a expectativa de que a luz das estrelas pudesse ter sua trajetória alterada quando passasse próxima a um corpo massivo, como por exemplo, o Sol. De fato, isso foi constatado durante o eclipse solar de 29 de maio de 1919, na cidade de Sobral, no Ceará, por uma equipe de astrônomos ingleses. A deflexão da tra-



34- Mudança da trajetória da luz devido a presença de um corpo massivo. Para um observador, a posição aparente do astro é alterada. Este desvio pode ser observado durante um eclipse total do Sol.



35- Esquerda: um corpo celeste como uma galáxia ou um aglomerado de galáxias atua como uma lente gravitacional, deformando a imagem de galáxias longínquas ou produzindo imagens múltiplas do mesmo objeto distante. Direita: imagens múltiplas de um Quasar distante, Q2237+0305, produzida por uma galáxia atuando como uma lente gravitacional (imagem de J.Rhoads, S.Malhotra, I.Dell'Antonio (NOAO)/WIYN/NOAO/NSF).

jetória da luz de uma estrela rasante ao bordo solar foi de 1,80 segundo de arco, muito próximo de 1,75, o valor teórico previsto por Einstein.

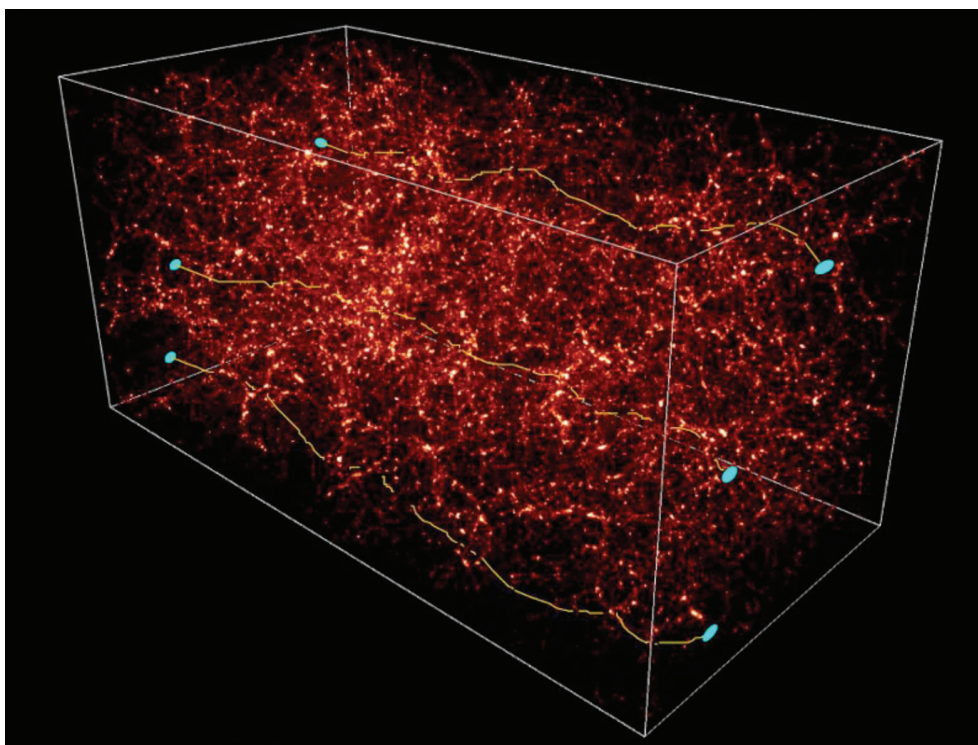
Esse mesmo fenômeno ocorre quando a luz de um objeto distante, digamos um quasar, passa pelas proximidades de uma galáxia ou um aglomerado galáctico. Neste caso quando há quase um alinhamento entre o quasar distante, a galáxia e nós, a galáxia atua como “uma lente” convergindo a luz e produzindo um anel em torno da galáxia, conhecido como anel de Einstein.

No caso de não haver alinhamento, ou se a “lente” for assimétrica, ao invés de um anel, observamos imagens múltiplas do objeto distante, como mostra a figura 46. Casos ainda mais espetaculares ocorrem quando a lente gravitacional é formada por um aglomerado de galáxias. Neste caso observamos arcos gravitacionais, que são imagens de galáxias distantes deformadas em forma de arco.

A observação desses arcos e imagens múltiplas permite determinar a massa total das lentes gravitacionais, isto é, das galáxias ou aglomerados que deformam as imagens dos objetos distantes. A observação de arcos gravitacionais confirma a determinação de que cerca de 85% da massa em aglomerados de galáxias é composta por matéria escura. Nos próximos anos os astrônomos esperam mapear a distribuição de matéria escura fora dos aglomerados galácticos analisando o efeito gravitacional em uma grande quantidade de galáxias e quasares distantes.



36- Imagens dos aglomerado Abell 1689 e Abell 2218 feitas com o telescópio espacial Hubble onde podemos observar dezenas de arcos gravitacionais.



37- A trajetória da luz de galáxias distantes é afetada pela teia cósmica de filamentos de matéria escura. Estudando a imagem destas galáxias distantes (em azul nesta figura) poderemos mapear a distribuição de matéria no universo (em vermelho aqui). Ilustração feita por Stephane Colombi e colaboradores do IAP, França.

CAPÍTULO 10

Cosmologia

Gastão B. Lima Neto

10.1 INTRODUÇÃO

10.2 BREVE HISTÓRICO DE MODELOS COSMOLÓGICOS

10.3 PARADOXO DE OLBERS

10.4 A EXPANSÃO DO UNIVERSO

10.5 A TEORIA DO BIG BANG

10.6 SOLUÇÃO DO PARADOXO DE OLBERS E O TAMANHO DO UNIVERSO

10.7 BASE TEÓRICA DA COSMOLOGIA E O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO

10.8 HISTÓRIA DO UNIVERSO

- Aniquilação da antimatéria
- Bariogênese
- Nucleossíntese primordial
- Fim da era da radiação
- Recombinação e radiação cósmica de fundo
- Idade das trevas
- Formação das primeiras estrelas e quasares
- A era da energia escura
- Futuro do Universo

10.9 COMPOSIÇÃO DO UNIVERSO: O LADO ESCURO DO UNIVERSO

10.10 ANTES DO BIG BANG?



1- Representação do universo segundo a mitologia egípcia do 2º milênio a.C., onde o deus Ra (o Sol) navega todos os dias pelo céu de leste a oeste.

10.1 INTRODUÇÃO

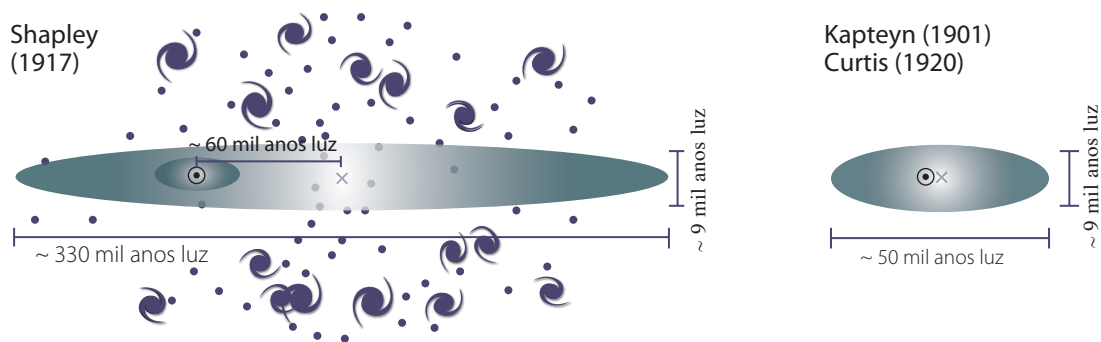
Cosmologia é o estudo da história, estrutura e composição do Universo como um todo. Pela observação e análise científica, procuramos entender como se formaram as galáxias, estrelas e planetas, como esses corpos evoluem com o tempo e como tudo isto se relaciona à origem do Universo. Não podemos observar nosso próprio passado, mas ao apontar os telescópios para as galáxias mais distantes podemos observar cenas remotas no tempo e no espaço. O método científico serve de guia para juntarmos as observações como peças de um quebra-cabeça que, ainda hoje, está longe de estar montado. Com as peças que temos, compomos a teoria mais aceita e de maior sucesso para explicar uma grande quantidade de observações, a teoria do Big Bang (Grande Expansão).

10.2 BREVE HISTÓRICO DE MODELOS COSMOLÓGICOS

Como se distribui a matéria, onde estamos, qual a nossa relação com a origem do universo? Estas questões são tão ou mais antigas que a nossa própria história. Para a maioria dos povos do passado, a percepção do Universo era infinitamente menor que a que temos hoje. A cosmologia se misturava a mitos, crenças e superstições.

As superstições da Antiguidade começam a dar lugar a uma visão racional de mundo há cerca de 2.500 anos na Grécia. Baseando-se em observações sistemáticas feitas durante séculos pelos povos da Mesopotâmia e Egito, filósofos gregos como Tales de Mileto e Pitágoras explicaram a distribuição e movimento dos astros utilizando modelos matemáticos e geométricos. No século 3 a.C., Aristarco de Samos, sugeriu pela primeira vez que o Sol está no centro do Universo. Mas a crença de que a Terra deveria estar no centro do universo prevaleceu e o modelo de mundo que emergiu dessa época e se tornou o paradigma por mais de 1.500 anos foi o Aristotélico geocêntrico, aperfeiçoado nos séculos seguintes por Hiparco de Niceia e Claudio Ptolomeu com o uso epiciclos.

O estudo da estrutura do Universo volta a avançar significativamente com os trabalhos de Nicolau Copérnico, Tycho Brahe e Johannes Kepler nos séculos 15 e 16. A utilização do telescópio para observações, introduzido por Galileu Galilei no início do século 17, revoluciona a astronomia.



2- Modelos de universo de Shapley e colaboradores (esquerda) e de Curtis e colaboradores (direita) debatidos durante as primeiras décadas do século 20. Shapley acertou quando disse que o Sol não estava no centro da Galáxia e Curtis acertou quando disse que as outras nebulosas eram galáxias como a nossa.

Pela primeira vez, Galileu revela a Via Láctea como um enorme conjunto de estrelas e mostra que o universo geocêntrico não é compatível com as fases de Vênus observadas por ele. A visão do Universo vai se tornando mais sofisticada e novos modelos surgem: Thomas Wright, Immanuel Kant e Johann Heinrich Lambert, em meados do século 18, propõem independentemente um modelo de “universos ilhas”, onde a Via Láctea seria uma destas “ilhas” assim como as chamadas nebulosas (objetos de aparência difusa descobertos então recentemente).

Chegamos ao início do século 20 com duas visões conflitantes quanto à estrutura do Universo: para o astrônomo holandês Jacobus Kapteyn (1851-1922) e o norte-americano Heber Curtis (1842-1942), a Via Láctea é pequena, com o Sol no centro – as nebulosas são sistemas distantes, semelhantes à Via Láctea. Mas na concepção do astrônomo norte-americano Harlow Shapley (1885-1972), a Via Láctea é grande, com o Sol na periferia – as nebulosas estão no interior da Via Láctea. Curiosamente, nenhum dos dois modelos era correto. Com os trabalhos dos astrônomos norte-americanos Vesto Slipher (1875-1969), Milton Humason (1891-1972) e, sobretudo, Edwin Hubble (1889-1953), ficou claro que as nebulosas espirais eram galáxias como a nossa e que o Sol está num subúrbio da Via Láctea.

A concepção que agora temos do universo é o resultado de milênios de observações cada vez mais sofisticadas, pesquisa, saltos conceituais e imaginação. Aprendemos que o Universo pode ser caótico, onde a complexidade das interações torna virtualmente alguns fenômenos imprevisíveis (por exemplo, o tempo que fará na semana que vem ou a posição dos planetas daqui a alguns milhões de anos), mas não é arbitrário e obedece às leis da física.

10.3 PARADOXO DE OLBERS

Uma questão aparentemente trivial, mas que tem importante significado para a cosmologia é: “Por que a noite é escura?”. Ingenuamente podemos pensar: “Ora, a noite é escura porque o Sol está iluminando o hemisfério oposto da Terra, onde é dia”. Sim, mas o Sol é uma estrela e existem muitas delas numa noite escura.

Em 1720 o astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1742) raciocinou da seguinte forma: o brilho de uma estrela diminui proporcionalmente ao quadrado da distância [porque a energia se distribui na

área de uma esfera, que aumenta com o quadrado do raio]. Se imaginarmos as estrelas distribuídas em cascas esféricas, como uma cebola, o número de estrelas em cada casca aumenta com o quadrado da distância. O aumento do número de estrelas compensa a diminuição do brilho e, se o Universo for infinito, o resultado final é que o brilho do céu deve ser infinito também, com ou sem Sol.

Em 1744, o astrônomo suíço Jean-Phillipe de Chéseaux (1718-1751) sugeriu a existência de algo que atenua o brilho das estrelas, assim a noite não seria infinitamente brilhante, nem mesmo tão clara quanto o dia. Essa questão passou a ser tratada como um paradoxo quando o médico e astrônomo amador alemão Heinrich W. Olbers (1758-1840) a popularizou em 1823 em seu artigo “Sobre a transparência do universo”. O paradoxo era uma decorrência da visão de universo do século 19, eterno e infinito.

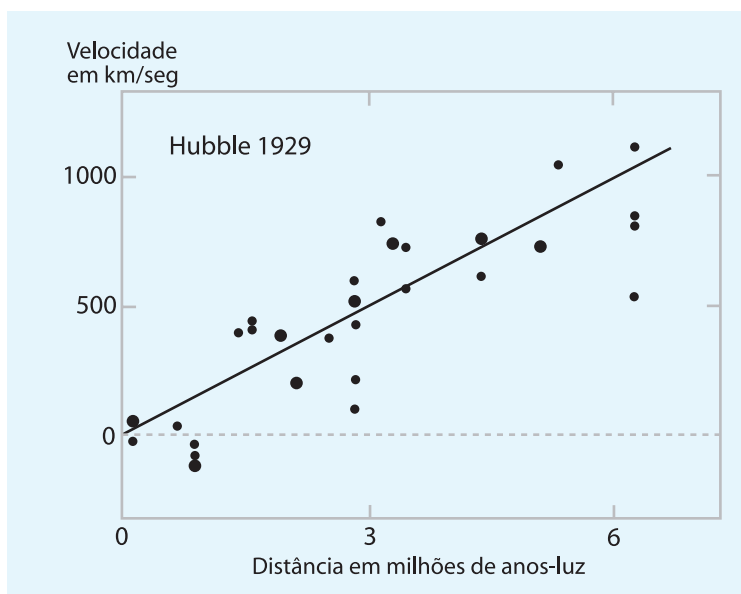
A solução desse paradoxo só seria descoberta no início da década de 1930.

10.4 A EXPANSÃO DO UNIVERSO

No início do século 20, ainda prevalecia a imagem de um universo imutável e infinito. Mas esse cenário começa a mudar quando, em 1908, a astrônoma americana Henrietta Leavitt (1868-1921) descobre a correlação entre o período de pulsação e a luminosidade das estrelas variáveis chamadas Cefeidas. Elas são estrelas evoluídas que já saíram da sequência principal e têm massa algumas vezes maior que a do Sol. A luminosidade dessas estrelas varia com períodos entre alguns dias e poucas semanas.

Alguns anos mais tarde, entre 1913 e 1915, Vesto Slipher obteve o espectro de diversas nebulosas e descobriu que alguns desses objetos estão se movendo à velocidade de várias centenas de quilômetros por segundo e, na maioria dos casos, se afastando de nós (a galáxia de Andrômeda é uma ilustre exceção e se aproxima com velocidade de cerca de 300 km/s em relação ao Sol. Em relação à Via Láctea essa aproximação é de 120 km/s).

Enquanto isso, em 1915, Albert Einstein publica sua teoria da relatividade geral e dois anos mais tarde Willem de Sitter (1872-1934) publica uma série de artigos discutindo as possíveis consequências observacionais da teoria de Einstein como, por exemplo, um cálculo preciso do desvio gravitacional da luz devido a um corpo celeste.



3- Relação entre a distância das galáxias e a velocidade de fuga descoberta por Hubble em 1929. A constante de Hubble obtida desta figura é grande demais, pois Hubble subestimou as distâncias das galáxias.

Não demorou para a teoria da relatividade ser aplicada no estudo da evolução do Universo. Em 1922, o russo Alexander Friedman (1888-1925) mostra que o tamanho do Universo pode mudar com o tempo. Com a morte de Friedman seus resultados são pouco divulgados até que, independentemente, o abade e astrônomo belga George Lemaître (1894-1966) descobre, independentemente, em 1927, a mesma solução de Friedman, isto é, de um universo dinâmico.

O momento da publicação dos resultados de Lemaître não poderia ser mais propício. Próximo de Los Angeles, na Califórnia, no final de 1917, fora inaugurado o Observatório de Monte Wilson, equipado com o telescópio Hooker com um espelho de 2,5 metros de diâmetro, o maior do mundo àquela época. Edwin Hubble usando esse instrumento conseguiu, em 1923, observar estrelas Cefeidas em algumas nebulosas e, usando a relação descoberta por Henrietta Leavitt, mediu pela primeira vez de forma precisa a distância desses objetos. Nos anos seguintes foram publicadas as distâncias, mostrando que essas nebulosas eram, de fato, outras galáxias.

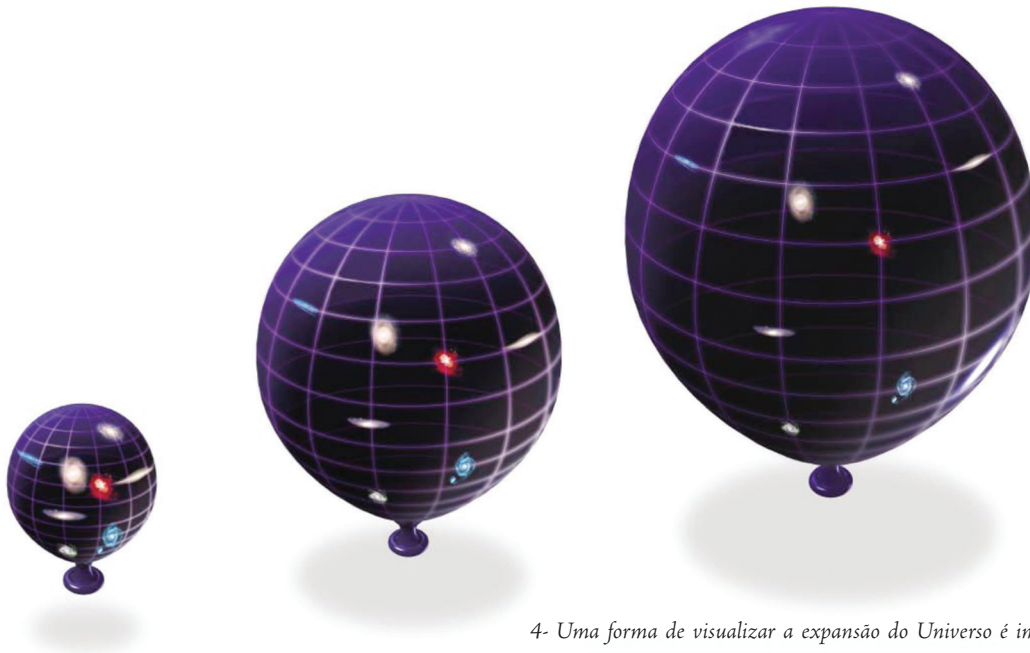
Mas, em 1929, Hubble foi ainda mais longe. Comparando as distâncias medidas com as velocidades das galáxias, ele verificou uma correlação entre elas: quanto mais distante a galáxia, maior a velocidade com que ela se afasta de nós. Essa relação ficou conhecida como Lei de Hubble e expressa pela relação:

$$V = H_0 \times D \quad (1)$$

onde H^0 é a constante de Hubble. Essa constante tem unidade de inverso de tempo [1/tempo], mas os astrônomos preferem utilizar uma unidade mais prática (alguns diriam mais esdrúxula) de [(km/s)/Mpc].

10.5 A TEORIA DO BIG BANG

A lei de Hubble foi rapidamente interpretada como uma observação da expansão do Universo, como previa as soluções de Friedman e Lemaître. Mas, se o Universo aumenta de tamanho com o tempo, isso significa que, no passado, era menor. Se extrapolarmos esse raciocínio em direção ao passado, chegaremos à conclusão de que em algum momento o tamanho do Universo foi nulo.



4- Uma forma de visualizar a expansão do Universo é imaginar um balão, com as galáxias e estrelas pintadas na superfície. Nessa analogia, todo o Universo está contido na superfície do balão. À medida que o balão vai inflando, as galáxias se afastam umas das outras.

A idade do universo pode ser estimada em primeira aproximação usando a relação: tempo = distância/velocidade = distância/($H_0 \times$ distância) = $1/H_0$.

O valor da constante de Hubble, nas unidades utilizadas pelos astrônomos, é de 72 ± 5 km/s/Mpc, ou seja, a cada megaparsec (cerca de 3 milhões de anos-luz) o universo expande 72 km/s mais rapidamente. Como o inverso de H_0 tem unidade de tempo, o valor acima significa que a idade do universo:

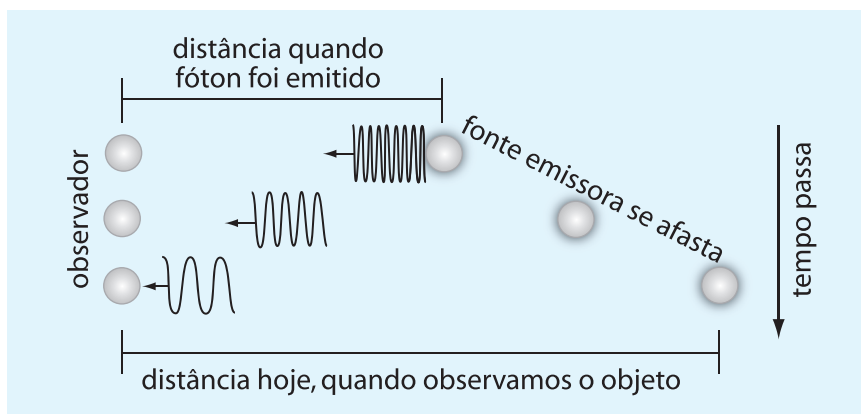
$$\frac{1}{H_0} = \frac{1}{72 \text{ km/s}} = \frac{1 \text{ Mpc}}{72 \text{ km}} s = \frac{3,086 \times 10^{19} \text{ km}}{72 \text{ km}} s = 4,286 \times 10^{17} s = 13,6 \text{ bilhões de anos} \quad (2)$$

Um cálculo mais preciso leva a esse mesmo número. O raciocínio de que todo o Universo esteve concentrado em um ponto de tamanho nulo no passado acabou conhecido como Big Bang, a grande "explosão". O nome Big Bang foi usado pela primeira vez pelo astrofísico inglês Fred Hoyle (1915-2001) de forma pejorativa, pois Hoyle e seus colaboradores defendiam um modelo de universo chamado de Estado Estacionário. Nesse cenário o Universo sempre existiu e sempre existirá, ou seja, não tem início nem fim. Essa teoria não é confirmada pelas observações, em particular, pela observação da radiação cósmica de fundo.

Pela teoria do Big Bang, o Universo não tem centro e não existe um ponto hoje em algum lugar de onde se originou a expansão. A "grande explosão" é um conceito muito diferente da explosão de uma granada, de onde saem estilhaços para todas as direções a partir de um centro (a própria granada). É mais adequado chamar o Big Bang de Grande Expansão. No Big Bang a expansão do Universo não se refere apenas à matéria, mas a tudo que existe, inclusive o espaço e o tempo. Antes do Big Bang não havia espaço, logo não pode haver um centro.

10.6 SOLUÇÃO DO PARADOXO DE OLBERS E O TAMANHO DO UNIVERSO

A solução do paradoxo de Olbers, discutida anteriormente, está na teoria do Big Bang. O céu noturno não é brilhante como o diurno porque vivemos em um universo relativamente jovem. Isso significa que somente podemos observar a luz (de forma geral a radiação eletromagnética) que teve



5- A distância de uma fonte observada hoje é muito maior do que a distância dessa mesma fonte quando ela emitiu a radiação observada por nós.

tempo para chegar até nós. Não podemos observar a luz de objetos além de certa distância e, muito menos, uma quantidade infinita de estrelas e galáxias.

Isso nos leva à questão do tamanho do Universo. Pode ser que o Universo seja infinito, então não teria sentido falarmos em tamanho. Uma forma mais conveniente de se expressar, neste caso, é referir-se ao tamanho do universo observável. Poderíamos imaginar que essa distância é o produto da velocidade da luz pela idade do Universo. Para uma fonte mais distante, não haveria tempo suficiente para a luz chegar até nós. Como o universo tem 14 bilhões de anos, então esta distância seria de 14 bilhões de anos-luz.

Mas o Universo está em expansão e as fontes de luz distantes estão se afastando uma das outras. Levando em conta essa expansão, o universo observável tem hoje um diâmetro de cerca de 92 bilhões de anos-luz.

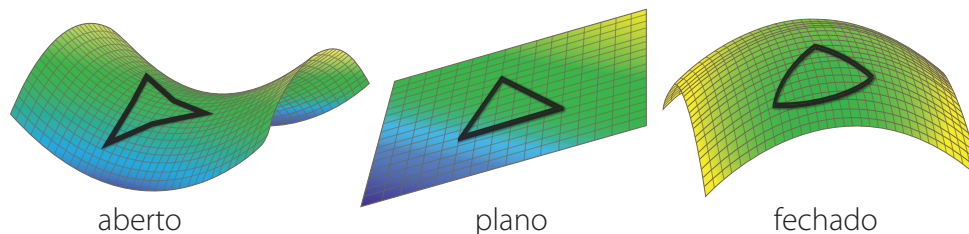
Assim, graças à expansão, podemos observar um volume muito maior do Universo do que poderíamos se o universo fosse estático.

10.7 BASE TEÓRICA DA COSMOLOGIA E O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO

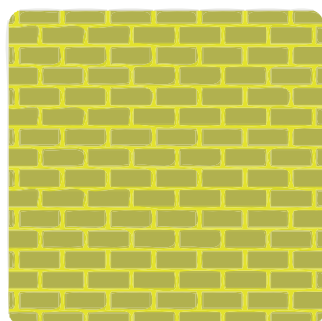
Do ponto de vista teórico, a cosmologia é baseada na teoria de gravitação de Einstein, conhecida como Teoria da Relatividade Geral. Essa teoria relaciona o conteúdo do Universo, matéria e energia com sua geometria.

A quantidade de matéria e energia determina a geometria do Universo, que pode ser plana, aberta ou fechada. O parâmetro que as distingue é a densidade de matéria e energia. Se a densidade for igual à densidade crítica, então o Universo tem geometria plana. Mas se for menor, então o Universo tem geometria aberta, como a curvatura de uma sela de cavalo. Nestes dois casos, o universo é infinito. Se, no entanto, a densidade for maior que a densidade crítica, o Universo é finito com geometria fechada, semelhante a uma esfera. A densidade crítica do valor medido para a constante de Hubble é estimada em 10^{-29} gramas/cm³, algo como um átomo de hidrogênio para 170 litros.

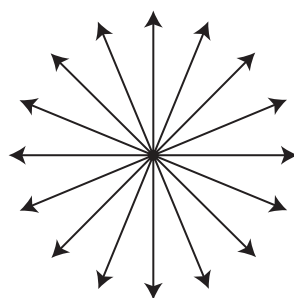
A densidade dos diferentes componentes do Universo (matéria, energia escura, radiação, estrelas, neutrinos etc.) é dada em termos do parâmetro de densidade, definido como: $\Omega = \rho/\rho_c$ onde



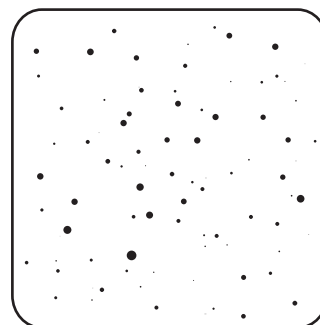
6- As três geometrias possíveis do Universo. No caso plano, também dito Euclidiano, a soma dos ângulos internos de um triângulo formado, por exemplo, por quasares distantes, é sempre 180° . No caso aberto, essa soma é sempre menor que 180° e no caso fechado é sempre maior que 180° .



Homogêneo, mas não isotrópico



Isotrópico (no centro), mas não homogêneo



Homogêneo e isotrópico (em grande escala)

7- Diferença entre homogeneidade e isotropia. A cosmologia é baseada no Princípio Cosmológico, em que o Universo é homogêneo e isotrópico em grandes escalas.

ρ e ρ_c são, respectivamente, densidade estimada por observação e densidade crítica. Por exemplo, o parâmetro de densidade de matéria é dado por Ω_M atualmente estimado em aproximadamente 0,3.

Um universo plano é aquele em que $\Omega = 1$, sendo Ω a soma de todas as componentes do Universo. Esse é o valor favorecido pelas observações recentes.

Além disto, é necessário um princípio básico para que a teoria da relatividade seja aplicada na sua forma mais simples. É o chamado Princípio Cosmológico, que admite: “O Universo é homogêneo (idêntico no seu todo) e isotrópico (mesma constituição em todas as direções)”.

O princípio cosmológico só é válido em grandes escalas. Na Terra, ao nosso redor não é nem homogêneo, nem isotrópico. Se passarmos para a escala do Sistema Solar, ainda assim observamos uma forte anisotropia. Os planetas, por exemplo, estão confinados em um plano fino que contém o Sol. Mesmo na escala da Galáxia ou do Grupo Local, o Universo não é homogêneo e isotrópico. Apenas em escalas superiores a cerca de 300 milhões de anos-luz constatamos a homogeneidade e isotropia cósmica, validando assim a adoção do princípio cosmológico.

O Princípio Cosmológico implica ainda que o Universo tenha a mesma aparência para qualquer observador em qualquer parte. Além disto, o Universo tem a mesma aparência qualquer que seja a direção observada.

Outra consequência do Princípio Cosmológico, é que o Universo não pode ter uma borda ou um limite. Se for infinito, então é natural que não haja uma fronteira, mas mesmo se for espacialmente finito, não haverá um fim ou uma borda em algum lugar como, por exemplo, a superfície de uma esfera. Se o Universo for de fato finito (isso está dentro das possibilidades corroboradas pelas observações), então um viajante hipotético, que se mova sempre para frente, posteriormente retornará ao ponto de partida, como um viajante que faz uma volta pelo equador da Terra.



8- Representação do espaço-tempo instantes após o Big Bang extremamente caótico. Os conceitos de direção e mesmo causa e efeito perdem sentido nesse caos espaço-temporal.

10.8 HISTÓRIA DO UNIVERSO

O momento do Big Bang ainda não pode ser descrito pelas leis da física que conhecemos. Neste instante o Universo é, segundo a teoria da relatividade geral, uma singularidade, algo fora do alcance das leis da física onde as propriedades como densidade e temperatura são infinitos. Isso indica que a teoria ainda está incompleta e muita pesquisa é realizada para complementar nossas teorias da física. Em uma teoria ainda mais completa e geral da física é possível que o Big Bang não seja uma singularidade, mas uma transição entre dois estados diferentes do Universo.

Assim, só podemos começar a descrever a história cósmica após um intervalo de tempo chamado tempo de Planck, por volta de 10^{-43} segundos. Esse é um intervalo de tempo muito curto, muitas e muitas ordens de grandeza menor que o menor intervalo de tempo que se pode medir em laboratório.

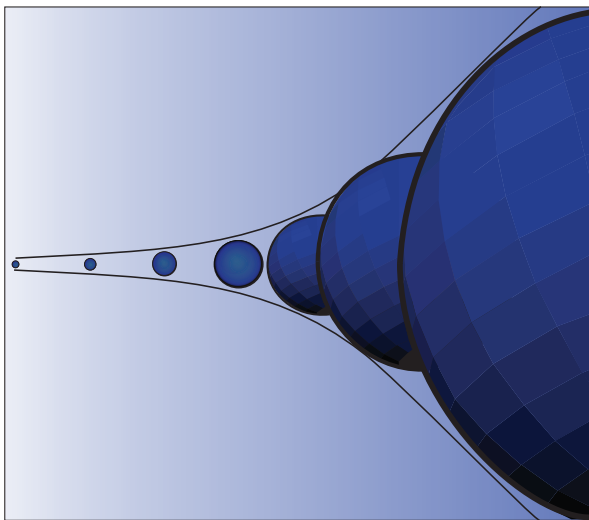
Nessa época de Planck, o Universo estava incrivelmente quente e denso. O próprio espaço-tempo era extremamente deformado por perturbações aleatórias. Toda a massa e energia cósmicas observável hoje concentrava-se em um volume pouco maior que um elétron.

Esse primeiro período da história cósmica também é chamado de Época da Grande Unificação, pois três das quatro forças da Natureza¹ (força eletromagnética, força fraca e força forte) se comportavam da mesma forma.

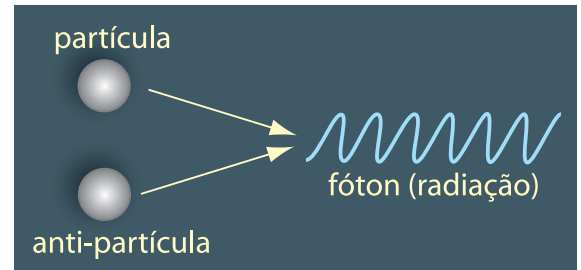
Após o Big Bang, quando o Universo tinha idade de 10^{-33} segundos, ocorreu um fenômeno chamado de inflação. A ideia desse período do Universo foi proposta pelo físico norte-americano Alan Guth, na década de 1980, para resolver alguns problemas teóricos do então cenário padrão do Big Bang.

Quando se resfria abaixo de 0°C a água se congela; esse fenômeno é conhecido como mudança de fase, no caso, de líquido para sólido. Na transição de fase há liberação de energia. Da mesma forma, ao expandir, o Universo esfria, passa por uma transição de fase e libera grande quantidade de energia. Possivelmente, a inflação ocorreu durante esta transição.

1. Força gravitacional é a quarta força fundamental. Força (nuclear) fraca é a que cinde as partículas, comumente vista no decaimento beta (decaimento radiativo). Força (nuclear) forte é a de interação entre quarks e glúons e que estabiliza o núcleo atômico.



9- Representação do aumento exponencial do tamanho do Universo durante a fase de inflação. Durante esta fase de expansão o Universo tem geometria cada vez mais plana.



10- Representação da reação de matéria e antimatéria produzindo radiação (fótons). Quando a energia é muito alta, época em que o Universo era muito quente e denso, os fótons podiam produzir um par de partículas de matéria e de antimatéria.

Chamamos esse período de inflação porque ao longo dela o Universo expandiu exponencialmente. Isso teve uma consequência importante para o tecido do espaço-tempo: apagou o caos inicial deixando o espaço-tempo homogêneo como é hoje. É como se pegássemos um tecido muito enrugado, esticando-o em todas as direções, deixando-o completamente liso.

Outro resultado importante da inflação é tornar o universo plano, como mostrado na figura 9. A curvatura do Universo pode ser medida, por exemplo, pela análise das flutuações de temperatura da radiação cósmica de fundo; sabemos que o Universo é praticamente (quem sabe exatamente) plano. Sem a inflação, a teoria do Big Bang não consegue explicar satisfatoriamente este nivelamento do universo.

Finalmente, a inflação explica outro aspecto, a uniformidade observada em todas as direções. Não importa para onde olharmos, observamos propriedades que implicam que o Universo deve ter expandido muito, muito mais que o previsto na teoria original do Big Bang, sem o período de inflação.

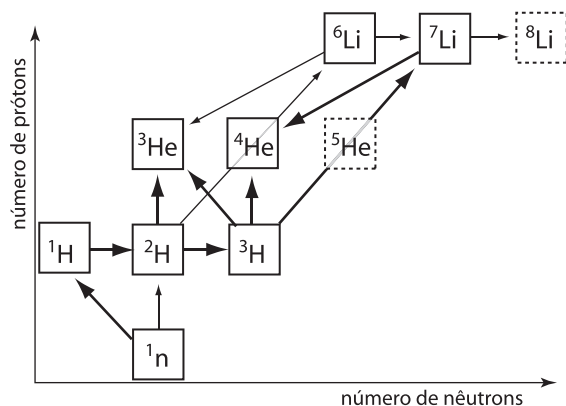
• Aniquilação da antimatéria

Após a fase de inflação, o Universo continuou a expandir e a resfriar, mas agora em um ritmo mais lento. Quando a idade cósmica atingiu um bilionésimo de segundo aconteceu outro evento histórico. Até então, o Universo era quente e denso o suficiente para manter em equilíbrio a matéria e a antimatéria. Mas quando esfriou, esse equilíbrio se perdeu e matéria e antimatéria começaram a se aniquilar, convertendo toda a massa das partículas em energia.

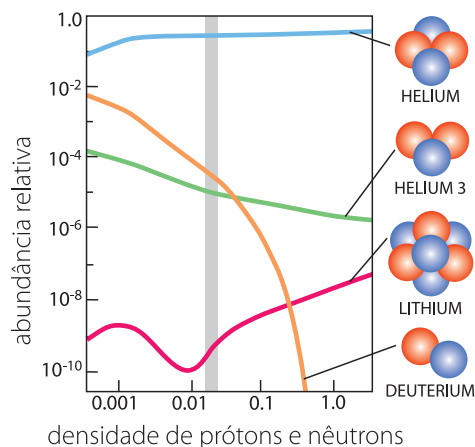
Para cada um bilhão de partículas de antimatéria existe em média um bilhão e uma partícula de matéria. O resultado dessa assimetria é que a antimatéria é virtualmente erradicada sobrando apenas a matéria de que nós e os astros somos feitos. A antimatéria continua sendo produzida no Universo em vários eventos (fusão nuclear no interior de estrelas, explosões de supernovas, interação de raios cósmicos na atmosfera da Terra etc.), mas a quantidade de antimatéria no Universo é irrisória.

• Bariogênese

Quando o Universo atingiu 0,00001 segundo de existência sua temperatura decaiu para 1 trilhão K. O Universo era composto por uma sopa de quarks. Quarks são partículas fundamentais da Natureza e formam todos os hádrons (partículas compostas por quarks). Em temperaturas inferiores a 1 trilhão K, os quarks se juntam definitivamente. Grupos de dois



11- Esquema de reações nucleares que ocorreram nos primeiros minutos do Universo, culminando com a formação de hélio.



12- Abundância de elementos formados nos primeiros minutos em função da densidade de prótons e nêutrons. A faixa vertical cinza indica o intervalo de abundâncias observado para estes elementos.

quarks formam mésons, partículas instáveis. Grupos de três quarks formam bárions; os dois bárions mais conhecidos são os prótons e os nêutrons. Por isto, essa época cósmica é chamada de bariogênese (formação de bárions).

• Nucleossíntese primordial

Nucleossíntese significa produção de núcleos atômicos a partir da fusão termonuclear de núcleos mais leves. Quando o Universo atingiu a idade de um segundo, já era formado de plasma² com densidade aproximadamente igual a da água e temperatura de 1 bilhão K. Os prótons e nêutrons que haviam se formado durante a bariogênese se envolveram em reações de fusão nuclear, formando principalmente o deutério (um isótopo do hidrogênio com um próton e um nêutron no núcleo).

O deutério é um elemento relativamente frágil e, até um segundo de idade do Universo, os fótons eram suficientemente energéticos para destruir esses núcleos. Passado o primeiro segundo, a temperatura e a densidade diminuíram a ponto de o deutério sobreviver o suficiente para continuar a cadeia de reações nucleares. Assim, foi possível formar o elemento hélio, principalmente o ^4He (com dois prótons e dois nêutrons no núcleo).

Esse processo de nucleossíntese primordial prosseguiu durante alguns poucos minutos formando ainda outros elementos, o lítio (Li), berílio (Be) e boro (B).

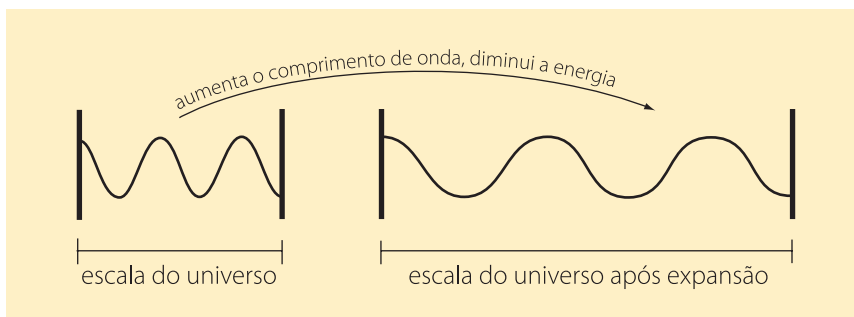
Aos cinco minutos de idade, a temperatura e densidade cósmica já estavam baixas demais para provocar reações nucleares e a nucleossíntese terminou.

Elementos mais pesados da tabela periódica não foram formados devido à grande instabilidade dos núcleos que tinham cinco ou oito partículas (por exemplo, dois prótons e três nêutrons, quatro prótons e quatro nêutrons etc.).

A física nuclear é relativamente bem conhecida e podemos prever a abundância relativa de elementos formados em função da quantidade de prótons e nêutrons no Universo.

A quantidade de deutério, hélio e lítio podem ser determinadas a partir de observações. Todas as

2. Gás ionizado constituído de elétrons livres, íons e átomos neutros, em proporções variadas e que apresenta um comportamento coletivo.



13- O comprimento de onda da radiação eletromagnética aumenta proporcionalmente à expansão do Universo. Este fenômeno dá origem ao desvio para o vermelho (em inglês *redshift*) cosmológico.

medidas apontam para a mesma quantidade de bárions no Universo. O valor mais aceito é que 4% do Universo é composto de bárions.

Cerca de 24% da massa dos bárions está na forma de hélio. Lembrando que o hélio é um produto da nucleossíntese estelar, o processo que gera a energia nas estrelas, poderíamos imaginar que o todo o hélio foi produzido em estrelas. Esse foi um dos argumentos utilizados por astrônomos contrários à teoria do Big Bang. Mas, fazendo a soma de todo o hélio produzido em estrela, chegamos a uma conclusão interessante: seriam necessárias dezenas de bilhões de anos para se conseguir todo o hélio observado. A única forma de se produzir tanto hélio é pela nucleossíntese primordial, durante os primeiros minutos de um universo quente e denso.

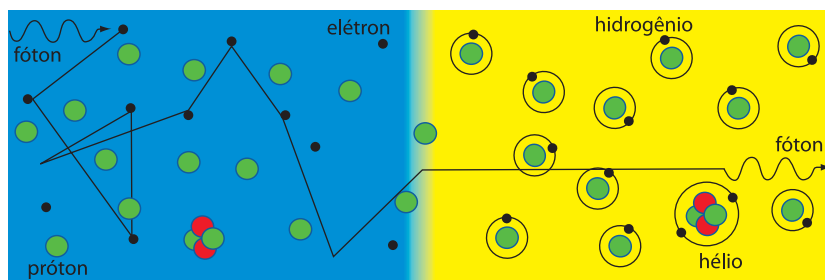
• Fim da era da radiação

À medida que o Universo expande, a densidade de matéria diminui proporcionalmente ao aumento do volume. Dobrando o volume do Universo, a densidade cai pela metade, e assim por diante. Se associarmos uma escala ao Universo (imagine uma régua que expande junto com o Universo) podemos escrever que a densidade de matéria é inversamente proporcional a esta escala elevada ao cubo: $\text{densidade da matéria} = 1/(\text{escala do universo})^3$.

Já a radiação tem comportamento diferente. Além de a diminuição da densidade de energia da radiação ser inversamente proporcional ao volume (como no caso da matéria), ainda há o efeito da própria expansão na radiação, como havia sido previsto em 1917 por William de Sitter. Considere a radiação como uma onda ligada em dois pontos. Se separarmos esses pontos (devido à expansão), o comprimento de onda aumenta. Logo, a frequência da onda diminui e sua energia também.

Dessa forma, a densidade de energia da radiação diminui proporcionalmente ao inverso da quarta potência da escala cósmica: $\text{densidade da matéria} = 1/(\text{escala do universo})^4$.

Isso significa que a densidade de energia de radiação diminui mais rapidamente que a densidade de matéria. No início, a temperatura era tão alta e o volume tão pequeno, que a densidade de energia da radiação era maior que a densidade de matéria. Mas com o passar do tempo, chegou um momento em que essas duas densidades, da matéria e radiação, se equipararam. Chamamos esse momento de “equipartição entre matéria e energia”, que marca o fim da era da radiação e o início da era da matéria. Isso ocorreu quando o Universo tinha 60 mil anos e estava à temperatura de 9.200 K.



14- Antes da recombinação, os fótons não podiam mover-se livremente pelo Universo, por isso mudavam de direção a cada encontro com um elétron. Após a recombinação os elétrons eram capturados e os fótons moviam-se livremente pelo espaço.

Esse é um momento importante, pois enquanto a radiação dominava não havia formação de estrutura; as galáxias e as estrelas não podiam se condensar. Quando a matéria passou a dominar a densidade, as estruturas começaram a aparecer.

• Recombinação e radiação cósmica de fundo

Finda a nucleossíntese, o Universo continuava expandindo e esfriando. Excluindo as componentes mais exóticas, como matéria e energia escura, o Cosmo ainda tinha a composição química primordial de 76% de hidrogênio e 24% de hélio. Todos esses átomos estavam completamente ionizados e os elétrons soltos.

Isso ocorreu devido à grande afinidade entre a radiação e os elétrons. Os fótons que estavam vagando eram ainda muito energéticos e quando colidiam com um elétron transferiam parte de sua energia. Os elétrons se tornavam tão energéticos que os núcleos atômicos não podiam retê-los. Outra consequência disso é que o universo era opaco para a radiação; em média, os fótons percorriam um caminho curto antes de interagir com um elétron e mudar de energia e de direção.

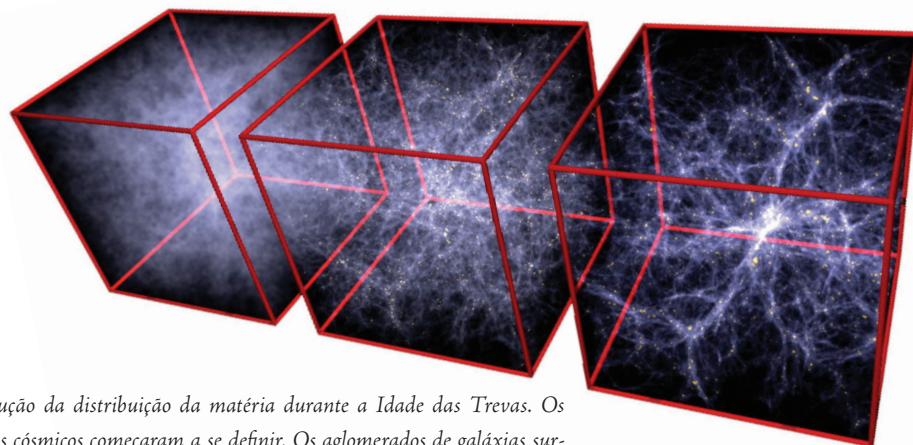
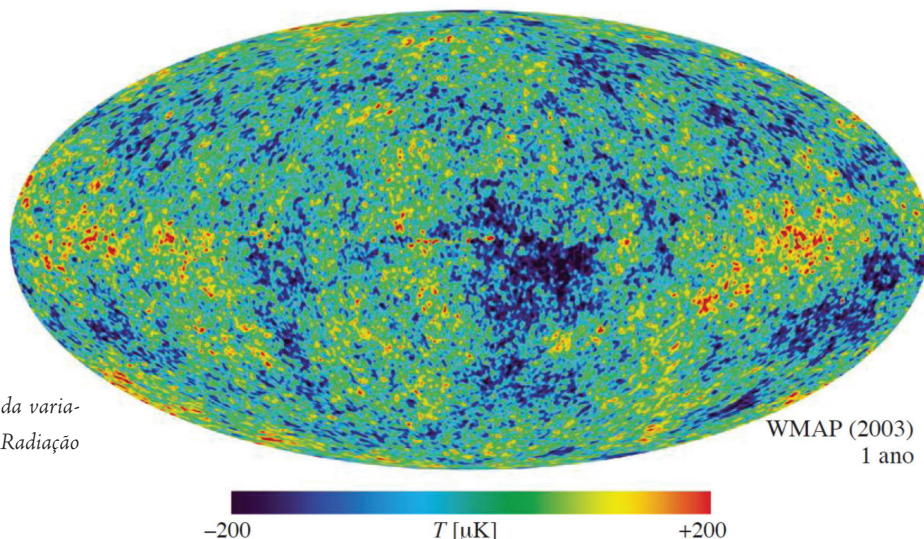
Quando a idade cósmica chegou a 400 mil anos e sua temperatura atingia 3.000 K, não havia mais fótons energéticos o suficiente para manter a matéria ionizada. Os núcleos começaram a capturar e reter elétrons. Os átomos se tornaram neutros e o universo ficou transparente para a radiação. Chamamos este momento de Recombinação. Nessa situação, a maioria dos fótons podia mover-se durante bilhões de anos sem interagir com a matéria.

Os fótons que interagiram com os elétrons pela última vez durante a recombinação são observados na Terra em todas as direções. Como esses fótons têm hoje uma frequência de radiação de micro-ondas, nós os chamamos de Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (RCFM).

A existência desse fundo cósmico de radiação foi prevista no final dos anos 1940 pelo físico russo naturalizado norte-americano George Gamow (1904-1968). Mas o tema caiu em certo esquecimento até que alguns astrofísicos voltaram a se interessar por ele, em particular um grupo da Universidade de Princeton nos Estados Unidos, no início da década de 1960.

Por coincidência, em 1964, dois físicos da companhia telefônica Bell, Arno Penzias e Robert Wilson, estavam trabalhando nessa época em uma nova antena para uso em radioastronomia. Nos testes desse instrumento, notaram a presença de um ruído persistente em todas as direções em que a antena

15- Mapa de todo o céu da variação da temperatura da Radiação Cósmica de Fundo.



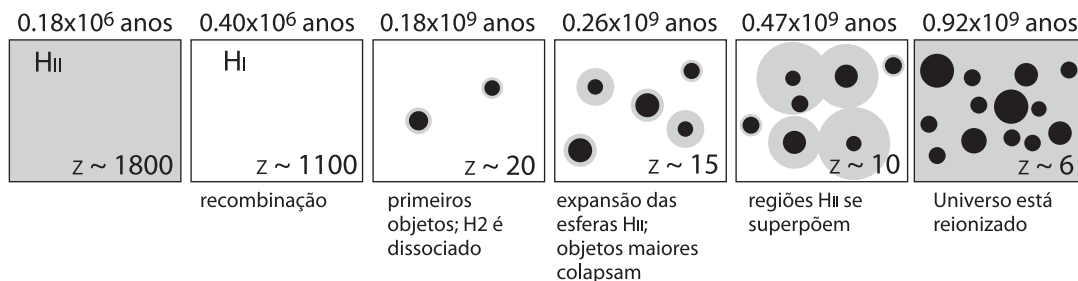
16- Evolução da distribuição da matéria durante a Idade das Trevas. Os filamentos cósmicos começaram a se definir. Os aglomerados de galáxias surgiram na intersecção dos filamentos da teia cósmica. As regiões de maior densidade que se desenvolveram nos filamentos são chamadas Halos.

era apontada. Após várias verificações do sistema, inclusive da suspeita de que o ruído viria de material orgânico produzido por pombos instalados na antena do instrumento, Penzias e Wilson concluíram que o ruído era um sinal real vindo de qualquer direção do céu.

Uma segunda coincidência fez com que tivessem contato com uma equipe da Universidade de Princeton, que buscavam justamente um sinal como o que estavam recebendo e encontraram a solução: o que Penzias e Wilson estavam registrando era a Radiação Cósmica de Fundo. Penzias e Wilson receberam o Prêmio Nobel por esta descoberta em 1978. A radiação cósmica de fundo tem temperatura muito bem determinada de 2,725°K, valor que coincide com o valor esperado pela teoria do Big Bang.

A Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas é extremamente rica em informações sobre o universo jovem. É uma impressão digital do Universo, mostrando que, há 14 bilhões de anos, a densidade era uniforme, mas não perfeitamente. As observações mostram pequenas flutuações na RCFM, interpretadas com indício de que havia flutuações de densidade, isto é, regiões mais ou menos densas que a média. Essas flutuações de densidade, no entanto, eram muito pequenas, algo como uma parte em cem mil. Imagine uma bola perfeitamente lisa, com um metro de diâmetro. Se ela tiver imperfeições na mesma escala que a RCFM, sua superfície terá pequenas elevações ou depressões com cerca de 0,01 milímetro.

A Radiação Cósmica de Fundo é uma das melhores evidências a favor da teoria do Big Bang, dificilmente explicada por algum outro modelo cosmológico.



17- História do Universo entre a época de recombinação e o fim da reionização. Regiões H_{II} , composta de gás ionizado, semelhante às regiões observadas na Via Láctea e outras espirais e galáxias irregulares onde há formação estelar. Acima dos quadros está a idade do Universo e o símbolo z indica o redshift correspondente. Os círculos escuros são regiões de alta densidade que podem se manter neutras, correspondendo ao interior das galáxias.

• Idade das trevas

Passada a época da recombinação, o Universo entrou em uma fase em que não havia qualquer fonte de luz, a chamada Idade das Trevas. Durante esse período, que durou cerca de 450 milhões de anos, a matéria foi se organizando e regiões com maior densidade de matéria passaram a colapsar.

Foi nessa época que se formou a teia cósmica traçada pela matéria escura. As regiões de maior densidade atraíam a matéria, aumentando com isso a densidade local, que implicava na atração de mais matéria. Em contrapartida, as regiões de baixa densidade iam gradativamente se esvaziando. Esse processo não tem simetria esférica, a matéria em queda não vem de todas as direções. A distribuição de matéria no jovem universo era sempre um pouco achatada, com uma forma grosseiramente semelhante à de um charuto amassado. A matéria cai nessas “sementes” de estrutura seguindo uma direção privilegiada (na analogia do charuto, essa direção é o eixo maior), e assim forma uma estrutura de filamentos.

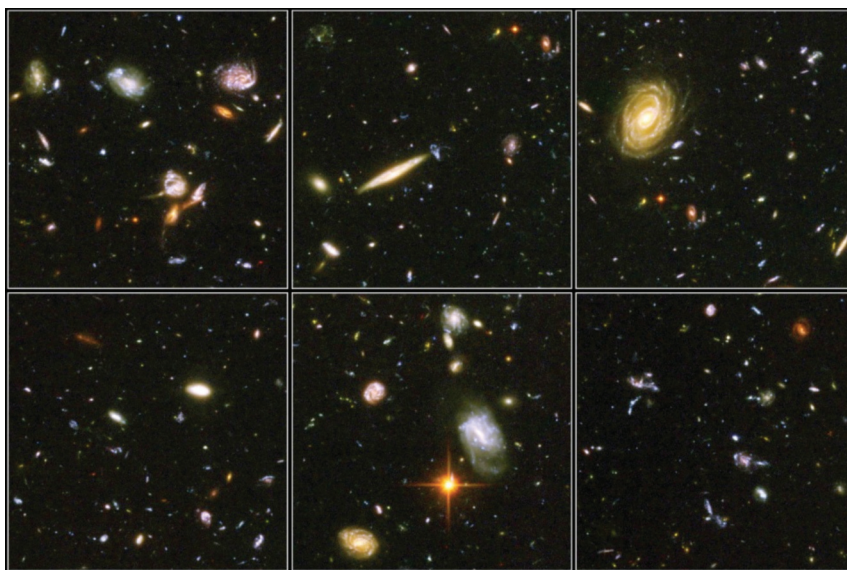
Os Halos de matéria, regiões aproximadamente esféricas e em equilíbrio, que se formaram nesse período, são as sementes das futuras galáxias e grupos de galáxias que irão se formar após a Idade das Trevas.

A Idade das Trevas termina quando as primeiras estrelas e/ou os primeiros núcleos galáctico se formam. Não sabemos ainda os detalhes do final desse período, mas os telescópios, terrestres e espaciais, ainda desta década de 2010 devem revelar essa história.

• Formação das primeiras estrelas e quasares

A formação de estruturas no Universo depende principalmente da matéria escura. A matéria “convencional” bariônica (que compõe os elementos encontrados na Terra, nas estrelas e no meio interestelar) acompanha a matéria escura nesse processo de formação. Inicialmente, a matéria bariônica apenas colapsava gravitacionalmente nos halos de matéria escura, mas à medida que a densidade aumentava a matéria bariônica passava por fenômenos não gravitacionais. Esses fenômenos envolvem ganho e perda de energia pela absorção ou emissão de radiação. A matéria bariônica emite espontaneamente, por exemplo, radiação (portanto perde energia) quando está aquecida acima de 10 mil graus.

Não sabemos exatamente o que se formou primeiro, mas os primeiros objetos colapsados eram muito energéticos. Quando o Universo atingiu entre 400 e 500 milhões de anos surgiram as primeiras fontes de radiação, que pareceram poderosos faróis.



18- Detalhes do campo ultraprofundo feito pelo telescópio espacial Hubble. As galáxias maiores e mais brilhantes estão relativamente próximas, a 6 bilhões de anos-luz. As mais fracas e menores estão a mais de 20 bilhões de anos-luz (imagem produzida por S. Beckwith do STScI).

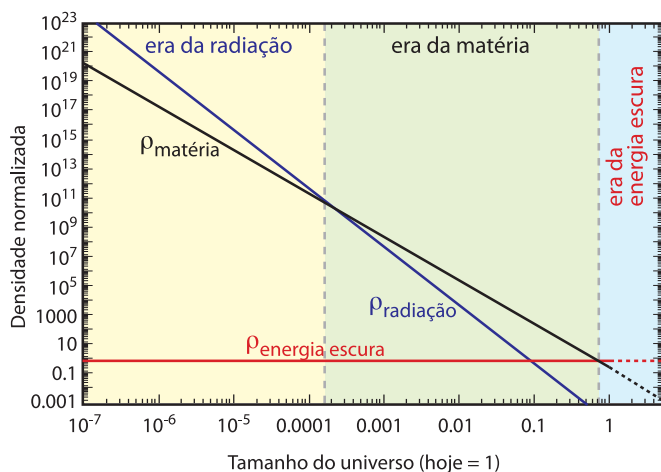
Um dos primeiros objetos a se formar foram as estrelas. Mas, diferentemente das estrelas atuais, essas pioneiras não tinham metais, sua composição química era primordial, com 76% de hidrogênio e 24% de hélio. A formação destas estrelas é um pouco diferente da formação das estrelas atuais. Sem metais, o resfriamento do gás é mais lento e as estrelas que se formam naquela época são em geral muito mais massivas que as estrelas que observamos hoje.

Por serem de grande massa as primeiras estrelas, chamadas de População III, eram muito luminosas, particularmente na faixa do ultravioleta. Mas, estrelas de grande massa vivem comparativamente muito pouco, apenas alguns milhões de anos, e morrem em uma poderosa explosão sob a forma de supernova. Estrelas de População III de baixa massa provavelmente não se formaram, por isso não encontramos nenhuma delas até agora; provavelmente elas nem existem mais em nossa galáxia.

Nessa mesma época, buracos negros supermassivos, com milhões de vezes a massa do Sol, começaram a ser alimentados pelo gás concentrado na região que será mais posteriormente o núcleo das galáxias. Esse é o processo que gera energia em quasares; além de muito eficiente, ele é também muito energético. A emissão de radiação ultravioleta desses novos quasares, junto com a radiação das primeiras estrelas, começava a ionizar o Universo novamente. Os átomos de hidrogênio e hélio nas vizinhanças dessas fontes foram os primeiros a perder seus elétrons. O Universo, que era neutro desde a época da recombinação, voltava gradualmente a se tornar um plasma ionizado. Esse processo se completou quando o Universo chegou a pouco menos de 1 bilhão de anos.

O final da reionização do Universo foi detectado no início do século 21 pela observação de espectros de quasares muito distantes. O início da reionização foi deduzido a partir das observações da Radiação Cósmica de Fundo do satélite WMAP.

Entre setembro de 2003 e janeiro de 2004, o telescópio espacial Hubble observou uma pequena fração do céu totalizando um tempo de exposição equivalente a 271,2 horas (11,3 dias). Essa observação, a mais profunda até então, permitiu a identificação de objetos tão débeis quanto magnitude 30, a distâncias entre 20 e 25 bilhões de anos-luz. Levando em conta o tempo necessário para a luz chegar até a Terra, isso significa que o telescópio espacial registrou o Universo como era quando tinha entre 1 a 2 bilhões de anos. O sucessor do telescópio Hubble, o telescópio espacial James Webb, recuará ainda mais no passado, possibilitando, talvez, observar as primeiras galáxias.



19- Evolução da densidade (ρ) das três principais componentes do Universo: energia escura, matéria (escura e bariônica), e radiação. As eras são definidas pela interseção da reta representando a densidade de matéria com a densidade de radiação e a densidade de energia escura.

• A era da energia escura

Como vimos, a densidade de matéria decaiu com o inverso do fator de escala do Universo elevado ao cubo (isto é, diminui proporcionalmente ao aumento do volume), enquanto a densidade de energia da radiação reduziu-se proporcionalmente ao inverso da escala do Universo à quarta potência. Ao entrar na era da matéria, a densidade de radiação cósmica se tornava desprezível frente à densidade de matéria existente à época.

Quando o Universo chegou à idade de dez bilhões de anos outra componente passou a dominar o balanço energético do universo: a energia escura.

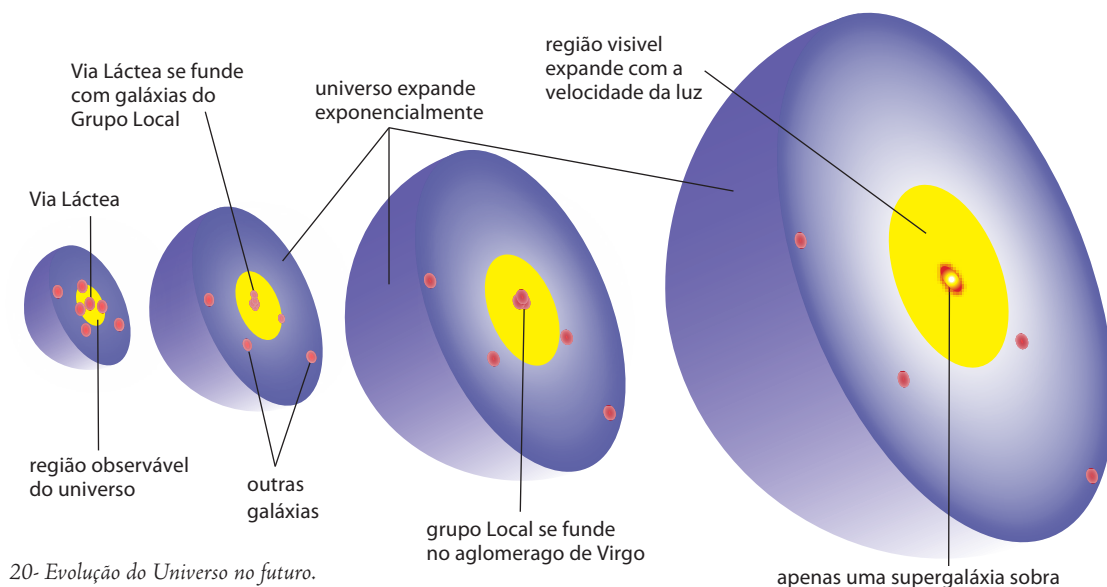
Ainda não sabemos o que é a energia escura, mas temos evidências de sua presença devido a um conjunto de observações. Admitindo o modelo mais simples de energia escura, preferido para interpretar as observações feitas, a densidade de energia escura é constante, independente da expansão cósmica.

A energia escura tem uma propriedade muito peculiar, sua pressão é negativa, proporcional à sua densidade no caso mais simples. Essa pressão negativa age de forma a acelerar a expansão do Universo cada vez mais rapidamente. Antes de o Universo chegar aos dez bilhões de anos a densidade de energia escura era menor que a densidade de matéria e radiação, fazendo com que a pressão negativa não fosse significativa. Isso é muito importante para a formação de galáxias e grupos de galáxias, pois a pressão negativa da energia escura dificulta a formação de estruturas. Se a densidade de energia escura fosse maior no nosso universo, nossa galáxia poderia não ter se formado, o que impediria a formação do Sol e do Sistema Solar.

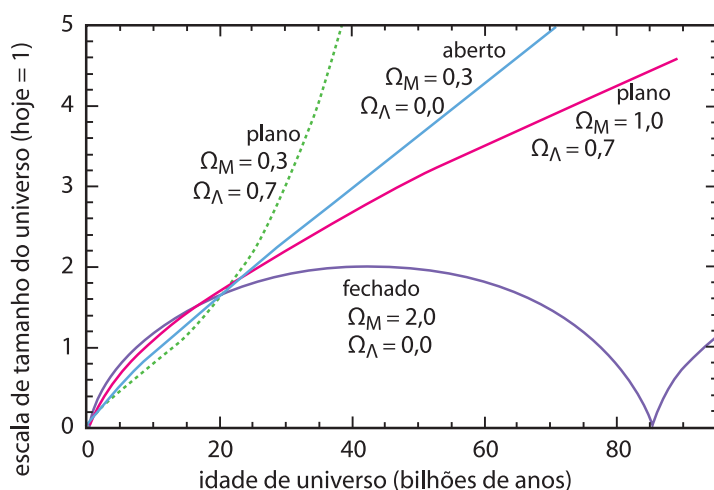
Nos últimos quatro bilhões de anos, o Universo está em fase de expansão acelerada devido à energia escura. Atualmente, o Universo está se expandindo cada vez mais rapidamente. Em mais alguns bilhões de anos, a expansão será exponencialmente rápida e a formação de estruturas cósmicas cessará completamente. Os maiores objetos que poderão colapsar no Universo serão os superaglomerados com até cerca de 10^{17} massas solares.

• Futuro do Universo

O destino do Universo depende da quantidade de matéria e energia. A evolução futura do Universo pode ser determinada conhecendo sua composição, mas também precisamos saber como a energia



20- Evolução do Universo no futuro.

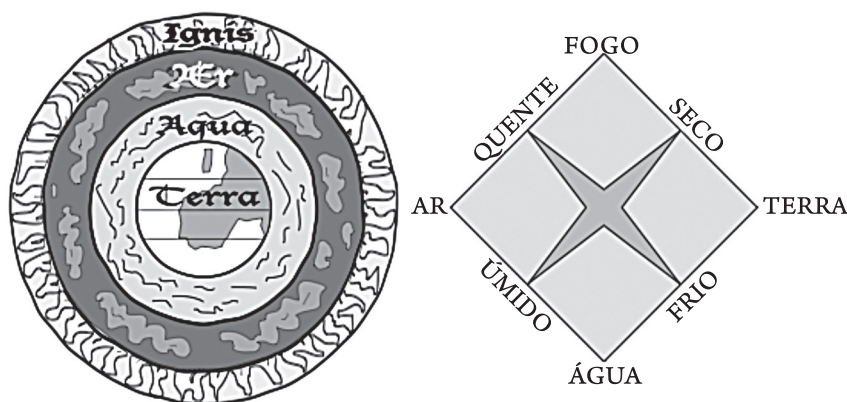


21- Evolução do universo para diferentes modelos cosmológicos. Para cada modelo são indicadas a geometria do universo e as componentes dominantes – Ω_M é o parâmetro de densidade de matéria e Ω_Λ é o parâmetro de densidade da energia escura. Os valores mais aceitos atualmente para o universo hoje são $\Omega_M = 0,3$ e $\Omega_\Lambda = 0,7$. Ω é definido na equação 3.

escura, a principal componente no universo atual, realmente se comporta, ou seja, se é uma constante ou se é um elemento com propriedades que se alteram com o tempo. Ainda não conhecemos a natureza da energia escura, mas podemos fazer previsões baseadas em propriedades possíveis de serem observadas e passíveis às leis da física ao nosso alcance atualmente.

Se a energia escura for uma constante da Natureza, no caso a Constante Cosmológica, introduzida por Einstein, então o Universo irá se expandir para sempre. Como a expansão é acelerada, tudo o que não estiver fortemente ligado pela gravidade na nossa região no Universo será arrastado para longe pela expansão e, em cerca de cem bilhões de anos não será mais vista nenhuma outra galáxia no céu.

Em contraposição, se a densidade da energia escura diminuir e desaparecer e, ao mesmo tempo, a densidade de matéria for um pouco superior a 10^{-29} g/cm^3 , então a expansão cósmica cessará no futuro e a gravidade fará com que o Universo se contraia indefinidamente até que toda a matéria e a radiação voltem a se concentrar em uma singularidade. O que pode acontecer depois disto é uma incógnita. A história, ao menos de uma etapa do Universo, pode terminar num Big Crunch (o inverso do Big Bang, que poderíamos traduzir livremente como a Grande Compressão). Ou então o universo poderia ricochetear em um novo Big Bang, ou seja, num renascimento.



22- Os quatro elementos básicos do Universo de várias culturas da Antiguidade. Um quinto elemento era acrescentado, representando o material celeste.

Um cenário mais exótico, e não completamente descartado pelas observações, seria o caso da energia escura ter uma pressão maior que a prevista para a Constante Cosmológica. Nesse caso, teríamos em alguns bilhões de anos uma expansão superexponencial. O espaço expandiria tão rapidamente que, posteriormente, nenhuma força da Natureza poderia impedi-lo. A princípio, as galáxias começariam a perder suas estrelas, depois as estrelas perderiam seus planetas e mais tarde os próprios planetas seriam esquarterados. Depois, os átomos seriam arrancados das moléculas, os elétrons dos átomos e os prótons e nêutrons dos núcleos. Finalmente, os quarks se separariam e o Universo terminaria em uma sopa de partículas elementares. Esse cenário é conhecido como Big Rip (Grande Rasgão).

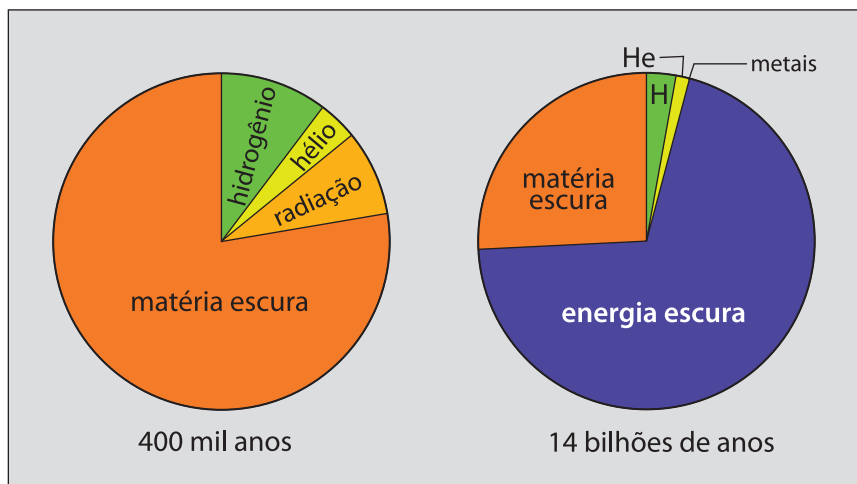
10.9 COMPOSIÇÃO DO UNIVERSO: O LADO ESCURO DO UNIVERSO

A composição do Universo em elementos básicos sempre foi um assunto debatido em diversas culturas. Na Antiguidade, um mundo composto de quatro elementos era uma visão comum. Na Grécia Clássica, os filósofos pensavam que os elementos básicos da Natureza era terra, água, ar e fogo. Para descrever todo o Universo, era acrescentado um quinto elemento, ou Quintessência, às vezes chamado de Éter.

Essas ideias evoluíram durante os séculos, com os conceitos atomistas, que também surgiram na Grécia clássica, e o desenvolvimento da química e da física. No início do século 20, já era aceita a noção de que a matéria no Universo e na Terra é composta dos mesmos átomos, embasado pela recém criada física quântica e pelas observações de espectros de objetos celestes.

Em 1933 surge a primeira evidência de que falta algo na receita do Universo. Observa-se que existe uma grande quantidade de massa nos aglomerados de galáxias que não podemos detectar diretamente, mas se que revela pela análise do movimento das galáxias. Esse assunto, contudo não atrai muitos pesquisadores e, até a década de 1970, a ideia reinante era de um universo composto de átomos e moléculas, isto é, matéria bariônica. A única dificuldade seria que nem toda a matéria bariônica pode ser observada por razões técnicas.

Mas no final da década de 1970, foi descoberta uma grande quantidade de matéria distribuída ao redor das galáxias espirais, formando um halo de matéria invisível ou escura. A partir daí iniciou-se uma



23- Distribuição das componentes do universo atual (a direita) segundo os últimos modelos cosmológicos: 70% está na forma de energia escura, 26% na forma de matéria escura, 3% na forma de hidrogênio, 1% na forma dos outros elementos da tabela periódica. A radiação contribui apenas com 0,005% para a massa/energíacósmica. À esquerda, a composição do Universo na época da recombinação.

investigação por um número crescente de astrônomos e físicos e, durante a década de 1980, ficou claro que a matéria escura não pode ser toda bariônica. O principal vínculo é a quantidade de matéria bariônica deduzida a partir da observação da abundância de elementos leves produzidos durante a nucleossíntese primordial. O modelo preferido de Universo é constituído então de uma grande quantidade de matéria escura de algum tipo desconhecido e uma pequena fração de matéria bariônica.

No ano de 1998, nossa visão de Universo foi revolucionada. As observações de supernovas distantes mostraram que esses objetos parecem menos brilhantes que o esperado, caso o Universo tivesse apenas matéria. Várias hipóteses foram descartadas e o melhor cenário para explicar o baixo brilho aparente das supernovas é a expansão acelerada do Universo, provocada por uma componente de pressão negativa chamada energia escura.

Neste mesmo ano de 1998, outra observação mostrou a presença de outra componente além da matéria. A análise das variações de temperatura da Radiação Cósmica de Fundo sugeriu que o Universo deve ter uma geometria plana, ou praticamente plana. Para isto, a soma das densidades de todas as componentes deve totalizar o valor da densidade crítica. Medidas independentes da densidade de matéria resultam em um valor de cerca de 30% da densidade crítica. Se o universo é plano, então 70% de seu conteúdo devem ser de outra natureza.

Para as próximas décadas, grandes esforços nas áreas experimental e teórica serão investidos na pesquisa da natureza da matéria e energia escura.

10.10 ANTES DO BIG BANG?

Na teoria padrão do Big Bang, baseada na física que conhecemos e testamos, e baseada nos chamados três pilares observacionais (o afastamento das galáxias, a abundância dos elementos leves e a radiação cósmica de fundo), não tem sentido falar de um momento anterior ao Big Bang. Tudo tem origem na Grande "Explosão", inclusive o espaço e o tempo.

Devemos ir além da física relativística e quântica se quisermos que a questão sobre o que ocorreu antes do Big Bang tenha, pelo menos, algum sentido. Na década de 1990 amadureceram novas ideias sobre a natureza cósmica e uma que tem mobilizado um grande número de pesquisadores é a Teoria

das Cordas. Por essa teoria o Universo tem três dimensões espaciais grandes (ou mesmo infinitas) e outras sete espaciais pequenas, e as partículas fundamentais são cordas unidimensionais que vibram. Diferentes modos de vibração produzem características às cordas e conjuntos de cordas formam as partículas que conhecemos, como quarks, elétrons, neutrinos etc.

Em alguns modelos cosmológicos baseado na Teoria das Cordas, o Big Bang seria apenas uma transição de duas fases do Universo. O Big Bang não seria uma singularidade mas apenas uma estrutura muito pequena, menor do que a escala de Planck, que corresponde à menor escala em que podemos aplicar as leis da física atual, equivalente à aproximadamente $1,6 \times 10^{-43}$ centímetro (cerca de vinte ordens de grandeza menor que o porte de um elétron!).

Também existem os cenários baseados nas branas (jargão inventado pelos físicos, que significa diminutivo de membrana). Por essa concepção nosso universo estaria contido em uma dessas branas que evoluiria em um meio de dimensão superior. Em uma das teorias de branas equipirótica (em grego significa deflagração), o Big Bang seria o resultado de uma colisão de branas e, além disto, essas colisões seriam recorrentes.

Mas aqui é preciso considerar que a Teoria de Cordas é ainda extremamente especulativa e não foi testada experimentalmente, e dificilmente isso ocorrerá em um futuro próximo.

CAPÍTULO 11

À procura de vida fora da Terra

Augusto Damineli Neto

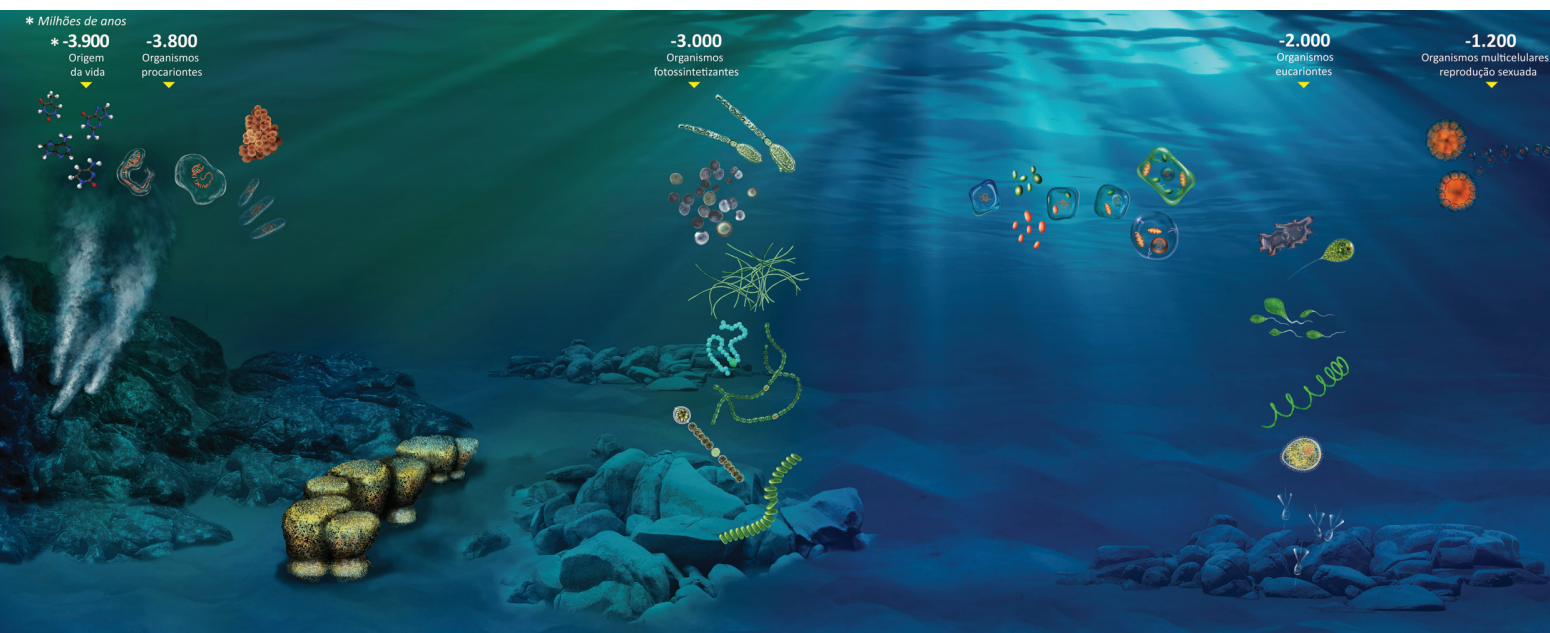
11.1 MICRÓBIOS: OS ETs DO SÉCULO XXI

11.2 OZÔNIO E METANO: SINAIS DE ATIVIDADE BIOLÓGICA

11.3 ÁGUA, ÁTOMOS BIOGÊNICOS E ENERGIA: CONDIÇÕES NECESSÁRIAS PARA VIDA COMO A DA TERRA

11.4 ONDE PROCURAR VIDA?

11.5 EXOPLANETAS ROCHOSOS: ESTRATÉGICOS PARA PROCURA DE VIDA FORA DA TERRA



11.1 MICRÓBIOS: OS ETs DO SÉCULO XXI

“Estamos sós no Universo?”

Esta pergunta vem ecoando no vazio através dos tempos. Esse vazio foi povoado por fantasias de alienígenas visitando a Terra. Alguns radioastrônomos desenvolveram detectores monitorando simultaneamente milhões de sinais para captá-los à distância. Mas nada até agora! E isso não é porque necessariamente não existam.

A pergunta: “tem alguém aí?” parece óbvia. Mas pode ficar sem resposta por uma lista enorme de motivos secundários. Ela pressupõe não só que existam seres “inteligentes” (ou melhor, que tenham capacidade de linguagem simbólica), mas que também disponham de tecnologia de transmissão de sinais e queiram dar sinal de sua existência. Não há qualquer teoria científica que possa nos guiar nesse terreno escorregadio.

Recentemente, astrônomos elaboraram uma pergunta mais promissora: “Existe vida como a da Terra em outros planetas?” Essa é uma questão que pode ser testada experimentalmente, encaixando-se assim no paradigma tradicional da ciência. Embora não tenhamos uma teoria geral da vida, sabemos como ela se manifesta na Terra e como detectá-la em outros planetas.

Para isso, no entanto, devemos explicar o que entendemos por “vida da Terra”. Seguindo o movimento que se iniciou com a revolução Copernicana, vamos tirar a humanidade do centro da vida. Olhando à nossa volta observamos um mundo repleto de outros animais e vegetais. Seria essa a vida comum de nosso planeta? Não. Existem muito mais espécies e organismos microscópicos que macroscópicos. Os microrganismos provocam impacto muito maior sobre a biosfera que os seres macroscópicos. A camada de ozônio, por exemplo, é formada pela fotossíntese, produzida principalmente por algas marinhas. Microrganismos anaeróbicos, que se alimentam da matéria orgânica no intestino de animais e da decomposição de restos vegetais, produzem uma camada de metano (CH_4) na alta atmosfera. Esses gases podem ser detectados facilmente por um observador fora da Terra, enquanto os seres macroscópicos permanecem literalmente ocultos sob a atmosfera, sob a superfície da água ou enterrados no solo. A contaminação biológica por microrganismos é facilmente detectável. Ainda mais, essa forma simples de vida infesta a Terra há 3,5 bilhões de anos, comparados com os 0,6 bilhão de anos da vida macroscópica. A janela temporal (seis vezes maior que para a vida



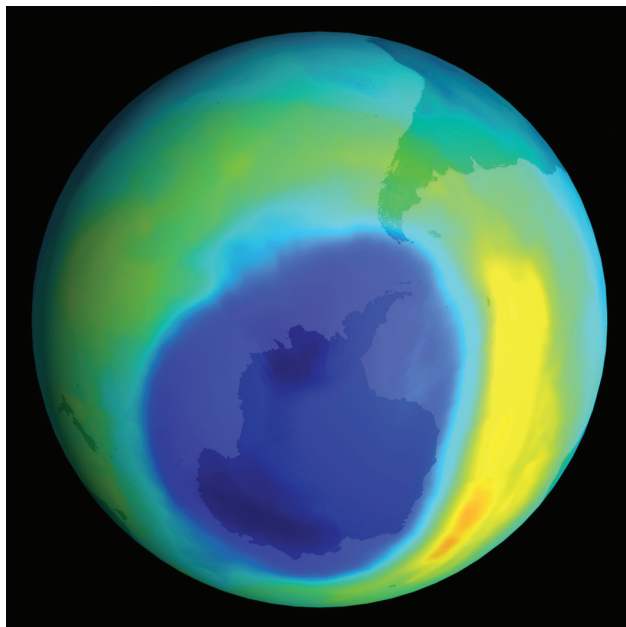
1- Os micróbios são e sempre foram os seres mais abundantes na Terra, os multicelulares só apareceram nos últimos 600 milhões de anos (crédito: Augusto Damineli, Paulo R.F. Santiago e Alex Hubbe).

complexa) dá uma grande vantagem de detecção para os microrganismos. Em contraposição, a vida microbiana é muito mais robusta que a complexa (multicelular), suportando temperaturas desde muito abaixo de zero até acima de 100 °C. O paradoxo é que os ETs da ciência moderna são invisíveis e isso os torna mais fáceis de encontrar!

11.2 OZÔNIO E METANO: SINAIS DE ATIVIDADE BIOLÓGICA

Mas, esses sinais indiretos seriam expressão inequívoca da existência de vida? O ozônio (O_3) em quantidade considerável e por longo tempo só é possível através da fotossíntese. Essa reação química produzida por seres vivos libera átomos de oxigênio na atmosfera, que sobem, formando O_2 e depois O_3 . O oxigênio é extremamente reativo e se combina com muitos outros átomos, de forma que a existência de uma camada de ozônio tem, em sua base, uma vibrante atividade fotossintética. O ozônio pode ser produzido por um raio numa tempestade, mas em pouca quantidade, e logo se dissipa. O bombardeamento de gelo por raios cósmicos também produz ozônio, mas em pequena quantidade e só em astros desprovidos de atmosfera. Além disso, a radiação ultravioleta do Sol decompõe o ozônio, de modo que a existência prolongada de uma camada implica uma incessante recarga de oxigênio por parte dos seres fotossintetizantes. A molécula de ozônio absorve a luz em comprimentos de onda específicos do infravermelho, constituindo-se numa assinatura inconfundível de sua presença. Esse é o principal sinal que vai ser procurado em outros planetas.

A camada de metano na Terra tem um comportamento muito semelhante ao do ozônio, sendo destruída e repostada continuamente pelos microrganismos anaeróbicos. Essa molécula, como todas as outras com mais de três átomos, também absorve luz infravermelha. O único problema do metano é que ele é produzido também por reações químicas abióticas (sem intervenção de organismos vivos). Os planetas gasosos, como Júpiter e Saturno, já nasceram com enormes quantidades de metano em sua atmosfera e só uma pequena fração é dissociada pela luz solar. Assim, encontrar metano num planeta gasoso não informa nada sobre a presença de vida anaeróbica. Mas, em planetas rochosos, como a Terra, Marte ou Vênus, a existência de grandes quantidades de metano na atmosfera seria



2- Camada de ozônio: sinal inequívoco de atividade biológica (crédito: NASA).

um sinal inequívoco de atividade biológica, principalmente porque esses planetas estão posicionados mais perto do Sol, onde a ação dos raios ultravioleta é intensa.

Aqui, no entanto, a primeira pergunta é: a probabilidade de formação de vida como a da Terra é alta ou baixa em outros lugares?

11.3 ÁGUA, ÁTOMOS BIOGÊNICOS E ENERGIA: CONDIÇÕES NECESSÁRIAS PARA VIDA COMO A DA TERRA

Os seres vivos contêm alta percentagem de água em sua constituição, indicando a importância do meio líquido para as células. Na verdade, isso indica que os seres vivos se originaram na água e levaram os oceanos encapsulados em suas células para enfrentar a aridez dos continentes. E é preciso considerar que, neste aspecto, a Terra é um local muito árido para os padrões cósmicos. Mesmo no Sistema Solar, para além de Júpiter, os corpos celestes têm quase 50% de água (a maior parte em forma de gelo). As nuvens interestelares, como o Saco do Carvão, contêm grãos de poeira recobertos de gelo. A água é uma das substâncias mais comuns e mais antigas do Universo. Ela se formou usando o hidrogênio (o átomo mais abundante no Universo), gerado no Big Bang, e o oxigênio (o terceiro átomo mais abundante), expelido na morte da primeira geração de grandes estrelas, 400 milhões de anos mais tarde.

Os outros átomos biogênicos: nitrogênio e carbono, também foram formados há mais de 11 bilhões de anos, quando estrelas um pouco maiores que o Sol começaram a morrer. Esses quatro elementos químicos (C, H, O e N) estão entre os cinco mais abundantes do Universo e formam mais de 99% da matéria viva. Embora em quantidades muito pequenas, o fósforo e o enxofre são importantes na obtenção de energia. Para formar as moléculas essenciais da vida é só adicionar um pouco de energia, que é bem abundante nas zonas de habitabilidade (ou água líquida) que existem em torno das centenas de bilhões de estrelas que formam as galáxias e que somam uma centena de bilhões dentro do raio de visibilidade do Universo.

Os ingredientes para a vida são muito frequentes no Universo, assim como os planetas rochosos, que devem superar a casa dos trilhões na Via Láctea. Mesmo as grandes moléculas elementares

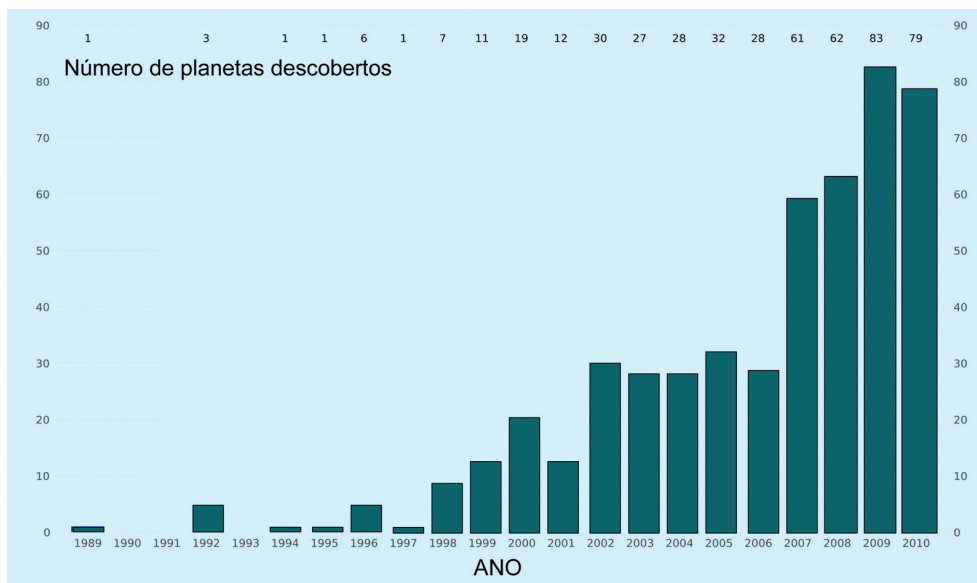
para a vida, como os aminoácidos, são produzidas por reações químicas abióticas no espaço. Elas foram produzidas em laboratórios terrestres tão simples quanto os que se podiam construir nos anos 1950. Além disso, muitos meteoritos que aqui aportaram trouxeram aminoácidos, inclusive de tipos diferentes dos vinte usados pelos seres vivos. Isso dispensa a necessidade de que os aminoácidos sejam produzidos na Terra, onde nunca houve abundância de hidrogênio livre, necessário para essas reações. As condições necessárias para a vida são amplamente disseminadas no Universo. Isso leva a um cenário de que ele é biófilo.

Mais um ponto a favor da ideia de que nosso universo é biófilo: a vida na Terra se estabeleceu praticamente junto com o próprio planeta. Os últimos grandes meteoritos esterilizantes caíram aqui há cerca de 3,9 bilhões de anos e algumas rochas de 3,8 bilhões de anos apresentam indicadores de processos biológicos. Levando em conta os processos que destroem os aminoácidos no fundo dos oceanos, a junção deles para formar moléculas de RNA deve ter ocorrido em tempos extremamente curtos: menos que dez milhões de anos, para escapar da reciclagem por vulcanismo. Na verdade, não mais que alguns meses, se o RNA tiver sido formado nas proximidades das chaminés térmicas nas profundezas submarinas.

Outro ponto ainda a ser considerado: muitos eventos catastróficos castigaram o planeta, como quedas de meteoritos, vulcanismo, glaciações e a vida nunca foi totalmente interrompida. Pelo contrário, após cada catástrofe, ela apresentava uma diversificação maior. Esse cenário mais amplo indica que a vida não é essa estrutura frágil como se costuma considerar. A vida é mais próxima de uma praga agressiva e resistente. Na verdade, viver é pregar. A vida é violenta e esse traço de violência é o segredo de seu sucesso. O fato de ela parecer tão complicada para nós, não implica que o seja para a natureza. O fato de ainda não a termos descoberto fora da Terra se deve, principalmente, ao fato de ainda não ter sido procurada com os meios adequados.

11.4 ONDE PROCURAR VIDA?

O Sistema Solar é, de certa forma, irrelevante para a procura da vida. Só a Terra está situada na zona de água líquida (em ambiente aberto). Marte se congelou há mais de 3,5 bilhões de anos e,



3- O número de exoplanetas descobertos cresce exponencialmente com o tempo.

no máximo, espera-se encontrar lá fósseis microscópicos que teriam vivido antes disso. Metano foi detectado em sua atmosfera, mas em concentrações tão baixas que poderia ter sobrado da formação do planeta e que hoje estaria emanando de camadas profundas abaixo da superfície. Caso se encontre vida em Marte e ela for do mesmo tipo da Terra, o problema vai continuar, pois será difícil decidir se a vida nasceu aqui ou lá e teria migrado de um planeta para outro de carona nos bilhões de meteoritos trocados entre esses dois planetas. Europa, um dos satélites de Júpiter, tem mares submersos, não sendo impeditivo para a vida. A nave Cassini detectou na finíssima atmosfera de Rhea, uma das luas de Saturno, a presença de pequena concentração de oxigênio e dióxido de carbono, que podem ser perfeitamente explicados por processos físicoquímicos abióticos. Plutão e sua lua Caronte têm mares submersos, o que não os impediria de abrigar vida. Onde quer que haja água líquida (sinal de energia em nível adequado) se poderia conceber a presença de vida como a da Terra primitiva, pelo menos, aquela que habitava as profundezas oceânicas e se nutria dos produtos químicos de fontes hidrotermais. Mas, essa estatística é restrita no Sistema Solar: poucas dezenas de corpos de dimensões razoáveis, incluindo planetas e satélites. Não podemos aplicar recursos vultosos para procurar vida em lugares de tão baixa probabilidade. Precisamos vasculhar milhares de mundos para ter números seguros. Para isso, temos que sair do nosso bairro solar e olhar para as estrelas.

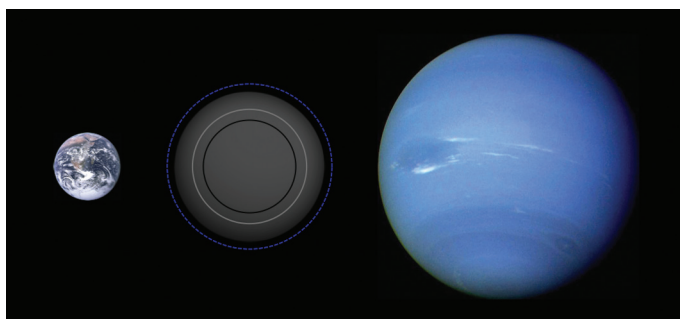
11.5 EXOPLANETAS ROCHOSOS: ESTRATÉGICOS PARA PROCURA DE VIDA FORA DA TERRA

Desde os tempos de Giordano Bruno, há mais de 400 anos, imaginava-se que existiriam planetas em torno de outras estrelas. Há pouco mais de uma década, nossa tecnologia atingiu o nível suficiente para detectar os maiores e mais próximos, somando hoje mais de 500, alguns deles já fotografados diretamente. Mas esses gigantes gasosos não são os ambientes promissores para a procura da vida. A convecção atmosférica desses mundos recicla os gases entre a superfície fria e o interior escaldante, fazendo deles ambientes autoesterilizantes. Não podemos proibir que a vida exista ali, mas preferimos aplicar os recursos em ambientes mais favoráveis. Na abundância de escolhas, vamos começar pelos que são parecidos com a Terra, com matéria nos estados sólido, líquido e gasoso.

Se o planeta tiver mais que 14 vezes a massa da Terra, seu calor é tão grande que torna-se gasoso. Se for muito menor que Marte (com massa dez vezes menor que a Terra), não poderá reter sua atmosfera. Na verdade, hoje se considera que planetas um pouco maiores que a Terra seriam os ideais para manter os três estados (sólido, líquido e gasoso) da matéria na superfície. Eles teriam mais calor interno e placas continentais mais finas que a Terra, facilitando a deriva dos continentes, que se constitui no termostato capaz de manter a água líquida. Na Terra, daqui a menos de um bilhão de anos, esse mecanismo não conseguirá mais compensar o efeito estufa e a biosfera será esterilizada. De qualquer modo, a janela de condições físicas adequadas (água líquida) terá se mantido aqui por mais de quatro bilhões de anos.

Mesmo nos restringindo a planetas rochosos, que circulam na zona de água líquida, o número esperado é de bilhões só na Via Láctea. Assim, tudo o que temos de fazer é construir telescópios com poder de resolução espacial (acuidade) suficiente para fotografar o planetinha separado da estrela hospedeira. Depois disso, analisamos sua luz por um espectrógrafo e procuramos as assinaturas de atividade biológica: ozônio e metano. Em pouco mais de uma década isso será factível e centenas de planetas serão descobertos a cada noite. Pode-se imaginar um enorme catálogo de planetas extrassolares com uma coluna marcando a identificação positiva e outra para os casos negativos. Todos iremos querer acompanhar pela internet, dia após dia, quantos X de identificação positiva haverá nessa lista. Se houver muitos, estará provado que a vida é uma mera oportunidade da química comum, como apregoam os evolucionistas (cientistas). Será um choque para a maior parte da humanidade, que ainda acredita que a vida exige um milagre para acontecer. Se não tiver nenhum, os criacionistas vão aconselhar os cientistas a conversar com o padre ou o pastor, pois a vida seria uma exceção. Mas, se existirem muitos, é claro que ela segue as leis da química comum. O desfecho é imprevisível. Qualquer dos dois resultados terá um profundo impacto no pensamento humano e a maioria das pessoas que vivem na Terra neste momento experimentará esses momentos excitantes.

Dentro de 15 a 20 anos, a instrumentação astronômica terá se tornado tão sofisticada que os admiráveis telescópios atuais da geração VLT (8 a 10 metros) serão quase peças de museu. O possível resultado negativo neste caso não será um problema para a ciência, pois ela mesma é que terá colocado a corda no pescoço. Mas a ciência funciona assim. Cria situações críticas, para testar suas



4- O planeta Gliese 581 d (comparado com a Terra e Netuno) é um dos primeiros exoplanetas rochosos encontrados na zona de água líquida (crédito: ESO e NASA).

afirmações. O teste da realidade é seu crivo de veracidade. Para os criacionistas, que não admitem que a matéria tenha o poder de criar coisas belas e complexas, será um golpe duro. Embora não haja como conciliar evolucionismo e criacionismo, é interessante notar que não existe um conflito entre evolucionismo e fé. Muitos religiosos esclarecidos são evolucionistas e não perdem a fé ao notar que seu cão é uma evolução do lobo, ou seu gato descende de felinos selvagens, como nós mesmos e outros primatas que descendemos de um obscuro mamífero.

O céu nos envolve. Olhamos para o alto em busca de estrelas e de planetas, mas também em busca de respostas. Alimentada por telescópios cada vez mais sensíveis, nossa curiosidade nos leva à descoberta de corpos astronômicos e a questionamentos sobre a natureza da matéria e da energia escuras.

Neste livro, astrônomos ajudam a aproximar o conhecimento atual de quem não está atrás do telescópio. Os capítulos conduzem o leitor a uma jornada pelo Universo – de sua origem à evolução das galáxias; de nosso Sistema Solar a sistemas planetários distantes; da influência do céu na vida dos homens à especulação sobre a vida fora de nosso planeta.

O céu que nos envolve é uma contribuição do Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP para a formação de uma cultura astronômica no Brasil. O projeto do livro inclui manual de apoio para educadores e materiais complementares na internet. Trata-se de levar a astronomia através não apenas de fronteiras espaciais, mas também de fronteiras sociais.



9 788578 760212

Grande Conjunto de Radiotelescópios Milimétrico/submilimétrico de Atacama, conhecido como ALMA (acrônimo de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), no planalto de Chajnantor, Deserto de Atacama, Chile, é um projeto em parceria entre Estados Unidos, ESO - Observatório Austral Europeu - e Japão."

