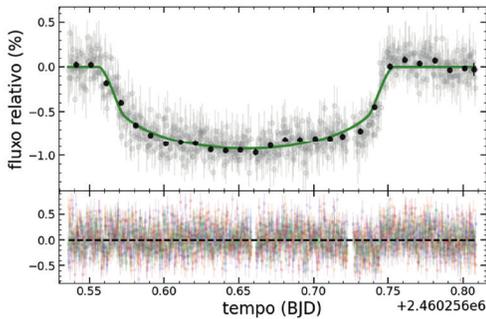
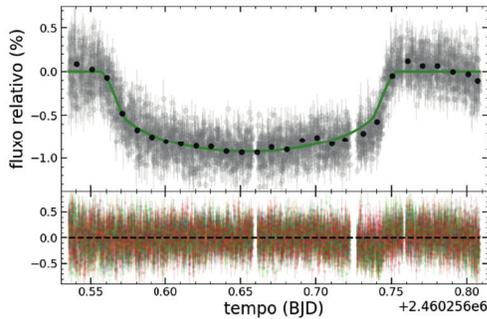


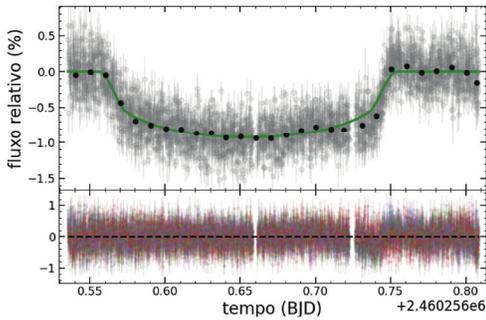
Banda g



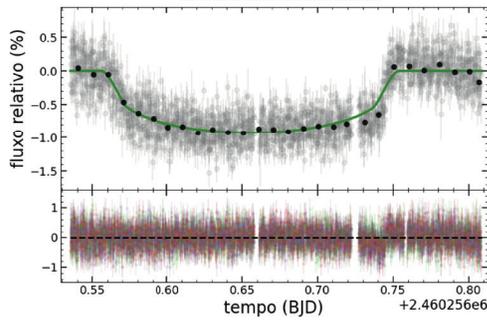
Banda r



Banda i



Banda z



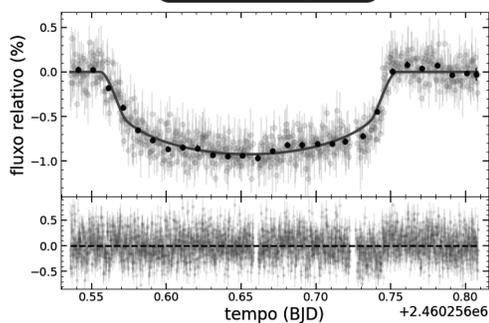
VOLUME 1

André de Castro Milone
Organizador

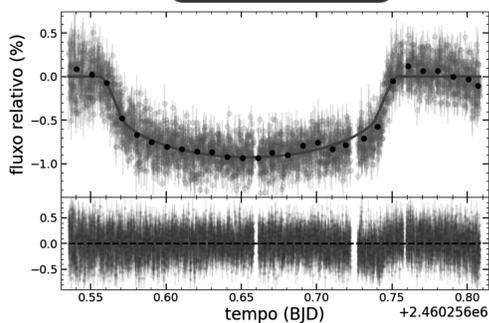
Introdução à Astronomia e Astrofísica



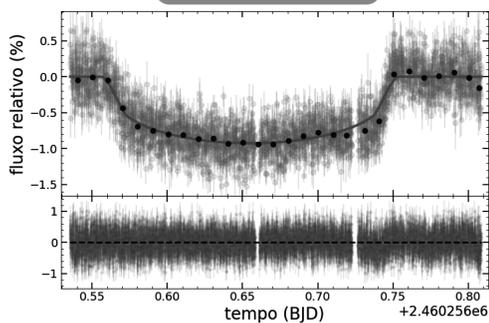
Banda *g*



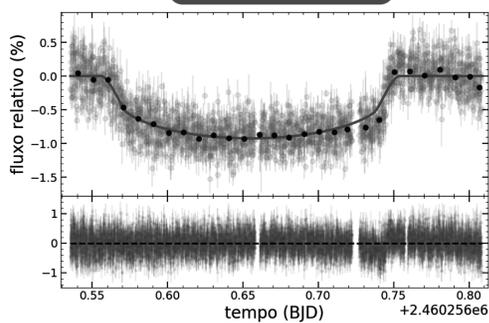
Banda *r*



Banda *i*

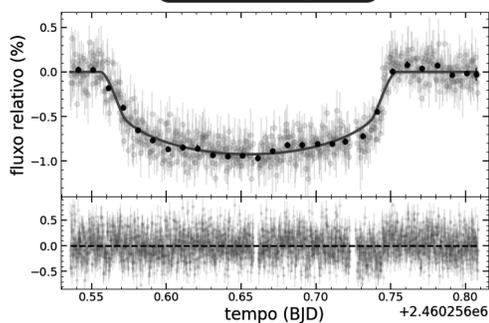


Banda *z*

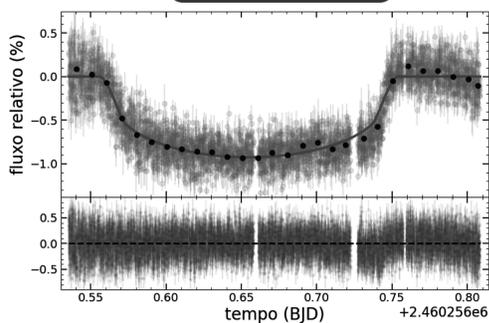


Introdução à Astronomia e Astrofísica

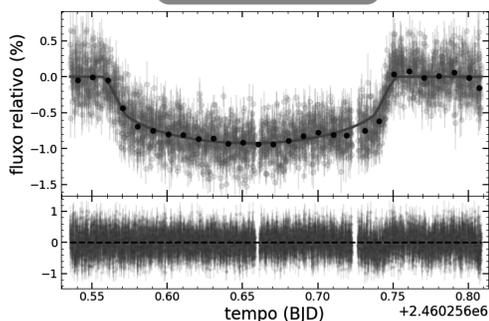
Banda *g*



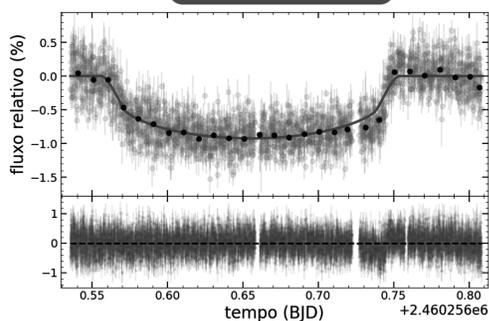
Banda *r*



Banda *i*



Banda *z*



VOLUME 1

André de Castro Milone
Organizador

Introdução à Astronomia e Astrofísica



Copyright © 2024 Autores

Editor: José Roberto Marinho e Victor Pereira Marinho

Editoração Eletrônica: Horizon Soluções Editoriais

Revisão: Horizon Soluções Editoriais

Capa: Horizon Soluções Editoriais

Imagem da capa: Fotometria diferencial do trânsito do exoplaneta WASP-78b nas bandas g , r , i , z com a câmera SPARC4 instalada no telescópio de 1,6 metros do Observatório do Pico dos Dias / LNA-MCTI, em 07/11/2023. Operadores: Leandro de Almeida e Laerte Andrade (LNA-MCTI). Eder Martioli (Laboratório Nacional de Astrofísica - MCTI).

Texto em conformidade com as novas regras ortográficas do Acordo da Língua Portuguesa.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Introdução à astronomia e astrofísica: volume 1 / organizador
André de Castro Milone. – São Paulo: LF Editorial, 2024.

Vários autores.

Bibliografia.

ISBN: 978-65-5563-407-5

1. Astrofísica 2. Astronomia 3. Buracos negros (Astronomia)
4. Estrelas 5. Sol I. Milone, André de Castro.

23-186247

CDD-520

Índices para catálogo sistemático:

1. Astronomia 520

Aline Grazielle Benitez – Bibliotecária – CRB-1/3129

ISBN: 978-65-5563-407-5

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão dos autores. Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei n. 9.610, de 19 de fev. de 1998.

Impresso no Brasil • *Printed in Brazil*



LF Editorial

Fone: (11) 2648-6666 | Loja (IFUSP)

Fone: (11) 3936-3413 | Editora

www.livrariadafisica.com.br | www.lfeditorial.com.br

Conselho Editorial

Amílcar Pinto Martins

Universidade Aberta de Portugal

Arthur Belford Powell

Rutgers University, Newark, USA

Carlos Aldemir Farias da Silva

Universidade Federal do Pará

Emmánuel Lizcano Fernandes

UNED, Madri

Iran Abreu Mendes

Universidade Federal do Pará

José D'Assunção Barros

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Luis Radford

Universidade Laurentienne, Canadá

Manoel de Campos Almeida

Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Maria Aparecida Viggiani Bicudo

Universidade Estadual Paulista - UNESP/Rio Claro

Maria da Conceição Xavier de Almeida

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Maria do Socorro de Sousa

Universidade Federal do Ceará

Maria Luísa Oliveras

Universidade de Granada, Espanha

Maria Marly de Oliveira

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Raquel Gonçalves-Maia

Universidade de Lisboa

Teresa Vergani

Universidade Aberta de Portugal

Sumário

Prefácio	9
1 Astronomia no dia a dia	11
1.1 Introdução	11
1.2 Nascimento da Astronomia	12
1.3 Percepção e contagem do tempo	14
1.4 Dias e noites	20
1.5 Estações do ano	35
1.6 Fases da Lua	51
1.7 Eclipse da Lua e do Sol	58
1.8 Marés dos oceanos	64
Referências	69
2 Astrofísica Observacional	71
2.1 Introdução	71
2.2 O Espectro Eletromagnético	72
2.3 Efeitos de diluição em ondas e radiação	96
2.4 Detectores e telescópios	102
2.5 Epílogo	116
3 O Sistema Solar	121
3.1 Introdução	121
3.2 A evolução do conhecimento sobre o Sistema Solar e um pouco de dinâmica	121
3.3 Descrição do Sistema Solar	130
3.4 A formação do Sistema Solar	160
3.5 Existem outros sistemas planetários no universo?	163
Referências	164
4 Habitabilidade Cósmica e a Possibilidade de Existência de Vida em Outros Locais do Universo	167
4.1 Introdução	167
4.2 Condições cosmológicas e astrofísicas para o surgimento de sistemas vivos	170
4.3 A evolução química do universo	174
4.4 Zona habitável e habitabilidade	181

4.5	Condições sobre a vida	186
4.6	Considerações Finais	190
4.7	Agradecimentos	192
	Referências	192

Prefácio

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

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

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

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

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

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

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

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

A evolução do Universo produziu o surgimento de um fenômeno singular: a Vida. O avanço científico e tecnológico vem fornecendo as bases para a pesquisa da existência de vida fora da Terra, um tema desafiador, inserido no campo da Astrobiologia. Particularmente, as observações indicam que os compostos necessários ao surgimento da vida estão disponíveis e espalhados no Universo há vários bilhões de anos. Mas o passo para a formação do primeiro sistema vivo ainda é desconhecido.

O avanço da ciência e tecnologia produziu também uma nova janela de investigação do Universo: a Astrofísica das Ondas Gravitacionais. A observação destas ondas poderá por exemplo nos informar se o Universo realmente teve início com o Big Bang, ou se existiu uma fase anterior a este momento. Poderá ainda contribuir com questões tão importantes como saber do que são formadas a matéria e a energia escuras.

Em resumo, em uma série de três volumes, são apresentados os tópicos fundamentais da astronomia e astrofísica, que também integram um curso de extensão oferecido pela Divisão de Astrofísica do INPE. O conteúdo aborda as linhas básicas do que a astronomia já conseguiu decifrar, delineando também um quadro da evolução das ideias e das técnicas utilizadas na pesquisa científica.

Particularmente, pretende-se ampliar o interesse de jovens (e adultos) na área e auxiliar os educadores nas várias disciplinas em que estes temas podem ser aplicados.



1. Astronomia no dia a dia

André de Castro Milone

1.1 Introdução

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

Este capítulo pretende, dentro de certas limitações, apresentar uma introdução aos fenômenos celestes que, embora estejam presentes em nosso dia a dia, passam despercebidos pela maioria. Os fenômenos relacionados exclusivamente à dinâmica da atmosfera de nosso planeta não são abordados. A influência da atmosfera terrestre na observação científica dos astros é enfocada no Capítulo Astrofísica Observacional.

1.2 Nascimento da Astronomia

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

1.2.1 Pré-história

Imagine-se agora em um passado muito remoto, mais precisamente na Pré-história (de 100 mil anos atrás até cerca de 8 mil a.C.), quando o ser humano vivia em pequenos grupos nômades. A preocupação com a sobrevivência num ambiente natural e hostil era crucial. Caçar, pescar, procurar frutas e raízes comestíveis, fugir de animais perigosos e abrigar-se das variações climáticas faziam parte do cotidiano do ser humano pré-histórico. Este precisava se adaptar à alternância do claro-escuro e à mudança das estações. Certamente, o Sol foi o primeiro astro a ser notado. As razões são óbvias: é o Sol que proporciona a mais evidente alternância de claro-escuro da natureza (o dia e a noite) e que atua como a principal fonte de calor para nós. A Lua foi o segundo astro a ser percebido, visto que ilumina a escuridão da noite, especialmente em sua fase cheia. As estrelas devem ter sido notadas em seguida, como pontos brilhantes em contraste a um céu bastante escuro. Os outros cinco astros errantes (significado original da palavra ‘planeta’, de origem grega) visíveis a olho nu só foram notados quando a observação do céu se tornou persistente noite após noite. Esse tipo de investigação da natureza já necessitava de um pouco mais de inteligência por parte de nossos ancestrais. Há desenhos rupestres (inscritos em rochas) que incluem figuras de astros. Tanto os astros como os animais, as montanhas, as florestas, os desertos e a água eram tidos como divindades porque não eram inteiramente compreendidos.

1.2.2 Mundo antigo

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

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

Das quatro civilizações citadas, a mais antiga é, sem dúvida, aquela que surgiu na Mesopotâmia, reunindo várias cidades bem estruturadas nas bacias férteis dos rios Tigre e Eufrates. Uma das cidades-Estado foi a Babilônia, cuja supremacia durou uns 300 anos. Os babilônios foram um dos primeiros povos a registrar a presença dos cinco planetas visíveis a olho nu (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno), certamente sob a influência cultural dos povos su-

mérios. Os deuses, os heróis e os animais desse povo eram associados aos astros observados. Na mitologia babilônica, a água líquida era a Mãe da natureza e sustentadora da Terra. O céu era representado por uma cúpula azul feita de rocha onde as estrelas estavam incrustadas, sendo a mesma sustentada pelas altas montanhas terrestres. Os babilônios buscavam entender as vontades dos deuses observando os astros no céu, as quais se refletiam de algum modo nos fatos terrestres. Assim, a Astrologia e a Astronomia nascem juntas, misturadas como um conhecimento único. A palavra *desastre* significa, primordialmente, um fato que contraria os astros. Conceberam as primeiras constelações, que eram apenas representações de figuras de deuses, animais e objetos “desenhadas” pelas estrelas. As constelações do Zodíaco são um exemplo.

1.3 Percepção e contagem do tempo

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

As primeiras organizações sociais humanas precisavam medir a passagem do tempo em inúmeras atividades práticas, tais como: saber a época certa para plantar uma determinada cultura, antecipar as épocas de cheia e vazante de um rio, prever as temporadas de chuva e seca, e marcar as datas de celebrações religiosas. Por incrível que pareça, a primeira marcação de tempo ocorreu para períodos longos (meses e anos) e não para intervalos curtos (dias e horas).

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

O QUE SÃO CONSTELAÇÕES?

Constelação é uma região da Esfera Celeste onde existe uma certa configuração projetada de estrelas. Os antigos astrônomos costumavam associar figuras de objetos, heróis ou deuses a tais configurações de estrelas. Muitas sociedades herdaram as constelações de outras enquanto algumas conceberam suas próprias constelações como aquelas do grupo indígena tupi-guarani. O termo constelação vem do vocábulo latino *constellatio*, que significa reunião de astros, muito embora as estrelas de uma constelação não estejam fisicamente reunidas pela gravitação em função das enormes distâncias que as separam. As 48 constelações clássicas foram compiladas pelo grego Ptolomeu em 137 d.C., incluindo as zodiacais. Parte das constelações clássicas simboliza histórias e mitologias herdadas dos povos antigos da Mesopotâmia e do Egito. Em 1929, a União Astronômica Internacional estabeleceu uma cartografia completa da Esfera Celeste contendo 88 constelações no total. As 40 outras, acrescentadas na Era Moderna, foram definidas principalmente na época das grandes navegações oceânicas. Elas simbolizam essencialmente animais pertencentes às novas terras “descobertas” pelos europeus e objetos usados na navegação da época. A maioria das constelações “recentes” situa-se no hemisfério sul do céu.

O QUE É NAVEGAÇÃO CELESTE?

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

1.3.1 Ano solar e lunação

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

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

1.3.2 História dos calendários ocidentais

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

Apesar de todos os ajustes efetuados na Roma Antiga, o ano juliano tinha em média 365,25 dias (ou 365 dias e 6 horas), sendo ligeiramente diferente do ano solar. A correção referente aos anos bissextos a cada quatro anos não foi suficiente. Ao longo de muitos anos, a diferença tornava-se cada vez maior, acrescentando um dia extra a cada intervalo de 128 anos, aproximadamente. Somente em 1582, o papa Gregório XIII (1512–1586) estabeleceu uma reforma crucial ao calendário ocidental. Assim foi a reforma gregoriana: (i) suprimiu 10 dias acumulados, para que o início de cada estação ocorresse na época certa; (ii) eliminou a ocorrência de anos bissextos durante três anos seculares para cada período de 400 anos, de modo que o ano 1600 foi planejado ser bissexto e os anos 1700, 1800 e

1900 não seriam bissextos (somente os anos seculares divisíveis por 400 são bissextos); (iii) a contagem dos dias do mês passou a ser caracterizada por números cardinais (1, 2, 3, ..., 31) e não mais pela ordenação de *kalendae*, *nonas* e *idus*.

No entanto, ainda assim, resta uma diferença residual entre o ano solar e o ano gregoriano, que causa o acréscimo de um dia para cada período de 3.333,3333... anos.

1.3.3 Calendário ocidental vigente

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

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

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

- (a) o primeiro é a duração do ano padrão;
- (b) a adição da fração $1/4$ corresponde à soma de um dia a cada quatro anos (os anos bissextos, que ocorrem em anos divisíveis por 4);
- (c) a subtração de $1/100$ mostra a necessidade de não incluir um dia a cada 100 anos;
- (d) a adição de $1/400$ indica a necessidade da ocorrência de um ano bissexto a cada 400 anos;
- (e) a última fração à direita diz que se deve suprimir a inclusão de um dia a cada 3.300 anos, aproximadamente.

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

ORIGEM DA SEMANA

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

DÉCADA, SÉCULO E MILÊNIO

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

O calendário juliano adota a época da fundação de Roma (753 a.C.) para o início da contagem, e o calendário gregoriano, que é essencialmente cristão, considera o nascimento de Jesus

Cristo. Contudo, parece que Cristo nasceu no ano 4 a.C. e não no ano 1 d.C. como se pensa. Além do mais, não existiu o ano 0 (zero), de modo que o primeiro período de 10 anos (uma década) começou no ano 1 terminando no ano 10, assim como o primeiro século que terminou no ano 100 e o primeiro milênio, que findou no ano 1000. Consequentemente, o século XXI e o 3º milênio começaram em 2001, e não em 2000, como muita gente pôde imaginar.

1.4 Dias e noites

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

1.4.1 Dia Solar e Dia Sideral

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

A primeira definição de dia veio da observação do Sol, que corresponde ao Dia Solar. Além do mais, por questões práticas, o ser humano sentiu a necessidade de criar uma ordenação matemática

para o dia/noite, visto que nós possuímos um relógio biológico interno, completamente adaptado ao ciclo diário do Sol. O Dia Solar corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas do Sol pelo Meridiano Celeste do lugar, uma linha imaginária no céu que une os Pontos Cardeais Norte e Sul passando pelo Zênite (ponto imaginário no céu diametralmente oposto ao centro da Terra). O Dia Solar (Verdadeiro ou Médio) é dividido por convenção em 24 horas solares (verdadeiras ou médias).

Outra referência astronômica para definir o dia é representada pelas estrelas. É o Dia Sideral. Corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas de uma determinada estrela pelo Meridiano Celeste Local. Por convenção e analogia ao Dia Solar, o Dia Sideral também é dividido em 24 horas; que são denominadas horas siderais.

O Dia Solar Médio e o Dia Sideral são diferentes pela simples razão de que a Terra não é imóvel e sim translada ao redor do Sol. *Qual é o mais curto?* Pensemos juntos: enquanto a Terra gira em torno do seu eixo, ela continua o seu deslocamento ao redor do Sol no mesmo sentido. Assim, para que o Sol volte a assumir a mesma posição no céu depois de uma rotação completa da Terra, serão gastos alguns minutos a mais. Portanto, o Dia Solar Médio é mais longo do que o sideral por apenas 3 minutos e 56 segundos em média.

$$1 \text{ Dia Solar Médio} = 24 \text{ horas (solares médias)}$$

$$1 \text{ Dia Sideral} \cong 23 \text{ horas } 56 \text{ minutos e } 4 \text{ segundos (solares médias)}$$

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

A noite é a parte do dia, de 24 h, quando o Sol está abaixo do plano do Horizonte. Há várias definições de noite. A noite civil começa (e termina) quando o centro do disco solar se situa a 6 graus abaixo do Horizonte; a noite astronômica, quando o Sol está a 18 graus. Os dias civil e astronômico são os complementos respectivos dessas definições de noite. Durante a noite astronômica, o céu não sofre alteração em brilho, enquanto no início e fim da noite civil há ainda claridade crepuscular. *Entretanto, por todo este capítulo, definimos “dia claro” como a parte do dia em que o Sol está acima do Horizonte e noite como seu complemento.*

MEIO-DIA SOLAR E GNÔMON ASTRONÔMICO

Quando o Sol cruza o Meridiano Celeste Local, estamos na metade tanto do “dia claro” como do dia civil e do dia astronômico, ou seja, às 12h ou ao ‘meio-dia’ do Dia Solar Verdadeiro Local. Diz-se que o Sol culminou, de modo que ele atinge sua altura máxima no céu, projetando a menor sombra de qualquer objeto. Se esse objeto for uma haste perpendicular a uma superfície horizontal plana (um gnômon astronômico), sua sombra mínima diária fica sempre alinhada à direção norte-sul. O gnômon é o mais antigo instrumento de observação astronômica.

TEMPO ASTRONÔMICO E TEMPO ATÔMICO INTERNACIONAL

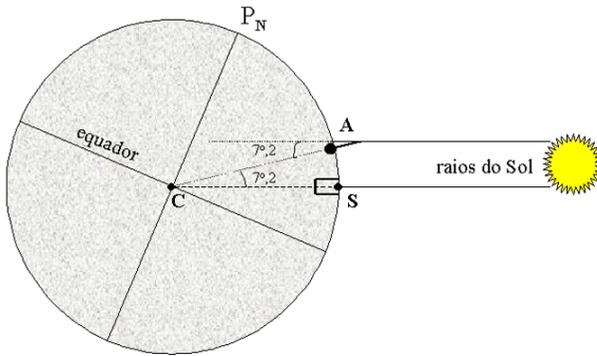
Até meados da década de 1950, a unidade básica de tempo, o segundo, era definida pela Astronomia. Um segundo de tempo correspondia a cada uma das 86.400 partes do Dia Solar Médio (1 segundo \equiv 1/86.400 de 24 horas solares médias). A partir de então, o segundo passou a ser definido como sendo o intervalo de tempo gasto por 9.192.631.770 ciclos de uma transição eletrônica hiperfina do átomo de Césio 133. Essa é a definição do segundo internacional, ou melhor, tempo

atômico. Contudo, o padrão de tempo usado por nós é o tempo universal coordenado, que corresponde ao tempo atômico corrigido na origem, toda vez que a diferença com relação ao tempo astronômico ultrapassa um certo valor.

1.4.2 Esfericidade e mobilidade da Terra

A ideia de imobilidade da Terra perdurou por muito tempo, até por volta do Renascimento Europeu, com a primeira revolução científica liderada por Nicolau Copérnico (1473-1543), Galileu Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1642-1727). O conceito de esfericidade para o nosso planeta não era totalmente aceito nessa época, embora Aristóteles (600 a.C.) já o tivesse proposto, ao observar eclipses da Lua (a sombra da Terra era sempre circular quando projetada na Lua), e Eratóstenes (240 a.C.) já tivesse calculado o raio terrestre. Com as grandes viagens de circunavegação, todos tiveram que aceitar tais ideias.

Eratóstenes notou que o Sol não ficava a uma mesma altura no céu, num dado dia do ano, simultaneamente em duas cidades do Egito Antigo (Alexandria e Siena, atual Assuan), as quais estão situadas aproximadamente ao longo de um mesmo meridiano terrestre. Ele observou que, ao meio-dia de um Solstício de Verão, enquanto o Sol iluminava o fundo de um poço d'água em Siena, um gnômon projetava uma pequena sombra em Alexandria, como é mostrado na Figura 1. Bastaria, então, conhecer a distância entre as duas cidades e o ângulo de separação entre elas em relação ao centro da Terra. Esse ângulo corresponde àquele formado pelo gnômon e o raio de luz vindo do Sol, cujo vértice é a própria extremidade superior do gnômon. Admitindo-se uma distância de 5.000 *stadia* (unidade de comprimento da época; 1 *stadia* \approx 185 m), a estimativa de Eratóstenes para o diâmetro polar da Terra foi de 14.722 km, próximo do valor real de 12.718 km.



$$d(AS) = 5.000 \text{ stadias} = 925 \text{ km} \quad \text{--->} \quad 7,2$$

$$2\pi R \quad \text{--->} \quad 360^\circ$$

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

$$2R = 14.722 \text{ km}$$

Figura 1 – Medição do raio terrestre por Eratóstenes (240 a.C.); ilustração fora de escala. O ponto A designa Alexandria; S, Siena, onde um poço é esquematizado; e C, o centro da Terra. O raio polar da Terra é designado por R. (Fonte: Elaboração do autor.)

É fácil compreender a concepção espontânea acerca da aparente imobilidade da Terra, seja ela esférica ou não. Do ponto de vista de uma pessoa sobre qualquer ponto da superfície terrestre, exceto os polos, percebe-se que tanto o Sol como a maioria dos astros surge do horizonte leste, elevam-se no céu e vão se esconder no lado oeste. Parece, então, que todo o céu está girando em torno de nós, mostrando que aparentemente estaríamos imóveis.

Além do mais, quando jogamos qualquer objeto verticalmente para cima, ele sempre cai em queda livre no mesmo lugar de onde saiu (se não estiver ventando no momento); dando a impressão de que a Terra como um todo não se move como era concebido pela Física Aristotélica admitida até a revolução científica do Renascimento Europeu. Contudo, segundo a Física Newtoniana, o mesmo pode-se afirmar quando repetimos essa experiência dentro de um veículo em movimento retilíneo e uniforme, que em primeira apro-

ximação poderia representar o movimento de rotação da Terra num dado ponto de sua superfície. Foi notório o debate científico entre as ideias revolucionárias de Galileu e o paradigma científico daquela época, este transformado em dogma pela Igreja Cristã. As leis de movimento elaboradas por Newton sustentaram a aceitação das ideias de Galileu: a Terra não está imóvel no centro do Universo, mas, na verdade, gira em torno de si mesma e translada ao redor do Sol (leia a Seção A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE O SISTEMA SOLAR E UM POUCO DE DINÂMICA do capítulo O SISTEMA SOLAR, para mais detalhes).

A rotação da Terra foi comprovada por medição direta não astronômica, em 1851, por meio do experimento do pêndulo de Léon Foucault (físico francês, 1819-1868). Ele verificou que ao abandonar um pêndulo à ação da gravidade, o plano de oscilação do pêndulo, que é invariável no espaço e no tempo, acabava girando em torno da vertical do lugar; isto é, girando relativamente no sentido contrário ao da rotação da Terra.

1.4.3 Esfera celeste e rotação da Terra

Qualquer pessoa ao observar o céu de um local descampado tem a percepção de estar no centro de uma enorme abóbada celeste. Esse tipo de visualização do céu contribuiu para a concepção do geocentrismo. O céu na Astronomia é idealizado como uma grande esfera de raio unitário sem unidade física, a Esfera Celeste, que ao ser apresentada centralizada no planeta Terra define a perspectiva geocêntrica (veja Figura 2).

O movimento dos astros no céu, ao longo de um dia ou uma noite, ocorre de leste para oeste. Dizemos que é um movimento aparente, porque não são os astros que se movem, mas, sim, a Terra que gira de oeste para leste. A Figura 2 mostra que a Esfera Celeste parece girar no sentido contrário ao da rotação da Terra.

A trajetória de um determinado astro durante seu movimento diário aparente ocorre paralelamente ao Equador Celeste, como visto na Figura 2. Esse círculo imaginário, que divide o céu em duas metades, nada mais é do que uma projeção do Equador Terrestre na Esfera Celeste.

A rotação da Terra define um eixo cujas interseções com a superfície terrestre são os polos geográficos Norte e Sul (pontos imaginários). Os círculos que unem os polos ao longo de sua superfície (hipoteticamente esférica) e são concêntricos à Terra são os Meridianos Terrestres. Um plano perpendicular ao eixo de rotação, e equidistante de ambos os polos, divide o globo em dois hemisférios, Norte e Sul. A interseção desse plano com a superfície da Terra define o Equador Terrestre. Os paralelos terrestres são os círculos imaginários paralelos ao Equador.

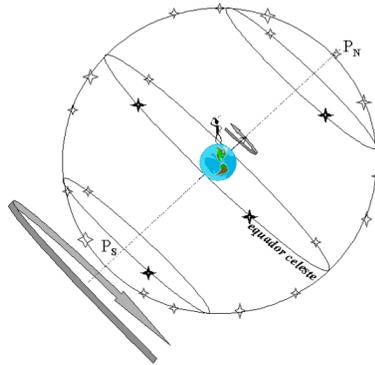


Figura 2 – A esfera celeste representada na perspectiva geocêntrica.
(Fonte: Elaboração do autor.)

Não concretamente percebemos ou “sentimos” a rotação da Terra porque a força centrífuga associada a ela é somente 3% da força de gravidade. Se a Terra passasse a girar cada vez mais rápido, chegaríamos ao ponto de ter gravidade zero, ou mesmo de sermos jogados para fora da superfície (de modo análogo a um carrossel). Contudo, a velocidade de rotação não é desprezível. No Equador

Terrestre, a velocidade linear de rotação fica por volta de 1.670 km/h. Sobre o Trópico de Capricórnio (latitude aproximada de São José dos Campos, cidade do estado de São Paulo), a velocidade de rotação é cerca de 1.500 km/h.

Da mesma forma que na Terra, existem na Esfera Celeste os polos Norte e Sul Celestes, definidos como sendo as interseções imaginárias do eixo de rotação terrestre com o céu (Figura 2).

COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Para localizar uma cidade no planeta Terra, precisamos de duas coordenadas: latitude e longitude. A latitude de uma localidade qualquer sobre a superfície da Terra é o ângulo contado, ao longo de seu Meridiano Terrestre, a partir do Equador Terrestre até a localidade. Por convenção, a latitude varia de -90° no Polo Sul até $+90^\circ$ no Polo Norte, passando por 0° no Equador. A longitude é o ângulo medido sobre o Equador a partir de um meridiano de referência até o Meridiano do lugar. O meridiano de referência do Sistema de Coordenadas Geográficas é aquele que passa pela Luneta Meridiana do Observatório de Greenwich (Inglaterra). A longitude é medida em graus ($^\circ$) ou em horas (h), indo de 0° no Meridiano de Greenwich até $+180^\circ$ (ou +12 h) quando contamos para leste a partir de Greenwich (no sentido da rotação terrestre), e até -180° (ou -12 h) quando contamos para oeste (no sentido contrário da rotação terrestre); é comum nomear como longitude leste e longitude oeste, respectivamente.

COORDENADAS CELESTES EQUATORIAIS

As coordenadas celestes equatoriais são definidas de maneira análoga às geográficas, sendo aplicadas à localização dos astros no céu. Precisamos, novamente, de duas coordenadas: declinação e ascensão reta. A declinação é contada a

partir do Equador Celeste, usando-se a mesma convenção: de 0° a $+90^\circ$ para norte e 0° a -90° para sul. A ascensão reta é contada sobre o Equador Celeste desde o Ponto Gama ou Vernal até o meridiano do astro no sentido de oeste para leste (o mesmo da rotação da Terra), variando de 0 a 24 h. O Ponto Gama é uma das interseções da Eclíptica (definida pela trajetória anual aparente do Sol na Esfera Celeste) com o Equador Celeste, marcando a passagem do Sol do hemisfério celeste sul para o hemisfério celeste norte (início da Primavera Boreal).

REGRA DA MÃO DIREITA E SENTIDO DA ROTAÇÃO TERRESTRE

Com a finalidade de visualizar ou representar o sentido do movimento de rotação da Terra no espaço, basta aplicarmos a regra da mão direita. Dispõe-se a mão direita com o dedo polegar para cima, o qual representaria o Polo Norte. O sentido da rotação terrestre é o mesmo daquele usado para o fechamento da mão (veja a Figura 2).

1.4.4 Hora solar e fusos horários

O Sol culmina no céu sempre às 12h do Dia Solar Verdadeiro Local (ou melhor, às 12h em hora solar verdadeira local). Porém, isso ocorre em instantes de tempos diferentes para cada meridiano terrestre, conforme a Terra vai girando em torno de si mesma. Enquanto em um determinado lugar o Sol está culminando, em outros locais a leste deste, o Sol já culminou e noutros a oeste ainda vai culminar. Do mesmo modo, enquanto em alguns lugares o Sol está surgindo no Horizonte, em outros o Sol está se pondo. Portanto, a hora solar é local e é fornecida diretamente por um relógio solar.

Além disso, o Sol não se desloca com a mesma velocidade ao longo de sua trajetória anual aparente (ao redor da Terra). Para cor-

rigir esse efeito, criou-se a hora solar média, a partir do movimento uniforme de um Sol fictício, que sempre se desloca ao longo do Equador Celeste.. A diferença entre a hora solar média e a hora solar verdadeira é definida como sendo a Equação do Tempo, e pode resultar em até 15 (quinze) minutos a mais ou a menos. A equação do tempo decorre do fato de que a velocidade da Terra em torno do Sol não é constante (translação ou revolução numa órbita elíptica) e de que o plano do Equador Terrestre/Celeste é inclinado com relação ao plano da Eclíptica (o plano orbital da Terra em torno do Sol).

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

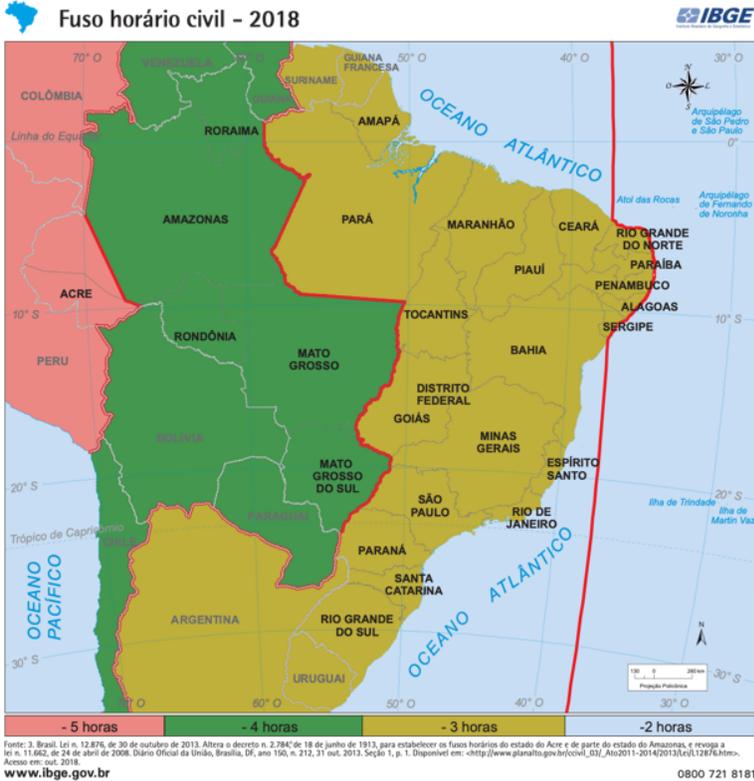
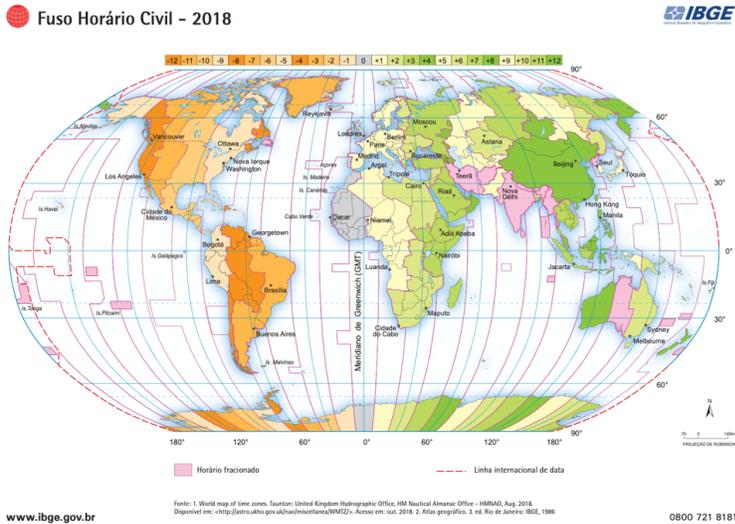


Figura 3 – Fusos horários da Terra e no Brasil.
(Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.)

O QUE É HORÁRIO DE VERÃO?

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

1.4.5 Aspectos do céu em diferentes latitudes

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

Para uma pessoa que está exatamente sobre o Equador da Terra (latitude 0° e longitude qualquer), ambos os hemisférios do céu podem ser observados por completo. Nesse caso singular, o plano do Equador Celeste está disposto perpendicularmente ao plano do Horizonte, e é representado pelo círculo que cruza o Zênite e une os Pontos Cardeais Leste e Oeste (Figura 4). No Equador Terrestre, as trajetórias diárias dos astros ocorrem em planos perpendiculares ao plano do Horizonte, de modo que, diariamente, todos os astros ficam metade do tempo acima do Horizonte e metade do tempo abaixo, como pode ser visualizado na Figura 4. Consequentemente, os “dias claros” e as noites têm a mesma duração de 12 horas, em média, ao longo de todo o ano. Os dias civis duram, em média, 12 horas e 48 minutos (noites civis de 11 horas e 12 minutos) e os dias

astronômicos, 14 horas e 24 minutos (noites astronômicas de 9 horas e 36 minutos).

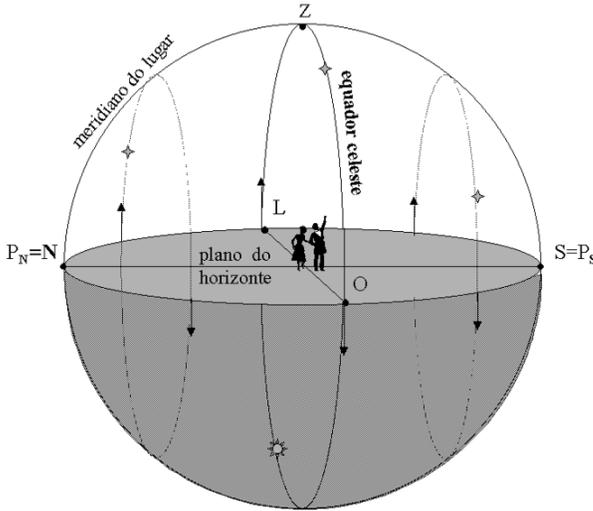


Figura 4 – Visão topocêntrica da da Esfera Celeste a partir de localidades ao longo do Equador Terrestre. (Fonte: Elaboração do autor.)

Se alguém se situar exatamente em um dos polos de rotação da Terra (latitude $+90^\circ$ ou -90° e longitude indeterminada), a visão do céu será completamente diferente da anterior. Nessa situação extrema, o círculo do Equador Celeste coincide com o do Horizonte, e o polo celeste respectivo, com o Zênite (Z). As trajetórias dos astros no céu ocorrem de modo paralelo ao plano do Horizonte, como é visualizado na Figura 5. Somente um hemisfério celeste é observado. Se estivermos no Polo Sul, avistaremos somente a metade sul do céu como é o caso da mesma figura. Os astros situados nesse hemisfério celeste nunca se “escondem” abaixo do plano do Horizonte. Há noites de 24 horas (quando o Sol estiver abaixo do Horizonte) e vice-versa no caso dos “dias claros”, quando ocorre o chamado sol da meia-noite. Os Dias Civis são de 24 horas durante toda a Primavera local, todo o Verão, início do Outono e fim do Inverno, de modo que as noites civis de 24 horas ocorrerão no restante do ano. Os Dias

Astronômicos abrangem semanas após o início do Outono e antes do início da Primavera, além de toda a Primavera e Verão.

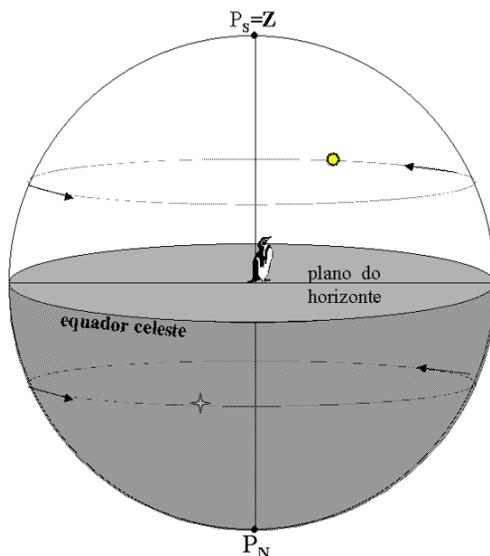


Figura 5 – Visão topocêntrica da Esfera Celeste a partir do Polo Sul.
(Fonte: Elaboração do autor.)

No caso intermediário, se estivermos fora do Equador ou de um dos polos terrestres, perceberemos que as trajetórias aparentes diárias dos astros ocorrem em planos oblíquos ao plano do Horizonte. O polo celeste, correspondente ao do hemisfério onde a pessoa se situa, fica elevado no céu, e o outro, abaixo do Horizonte. Os astros ficam uma parte do dia visíveis acima do plano do Horizonte e a outra parte abaixo do mesmo, em períodos desiguais. Certos astros próximos do polo celeste elevado ficam sempre acima do Horizonte (aparentemente girando em torno desse polo), e uma parte do céu próxima ao outro polo celeste nunca é visível.

Especificamente em um local no hemisfério sul da Terra, como ilustrado pela Figura 6, o Equador Celeste certamente se apresenta oblíquo ao Horizonte, estando inclinado para a direção norte sob um ângulo igual à latitude do lugar com relação à direção vertical.

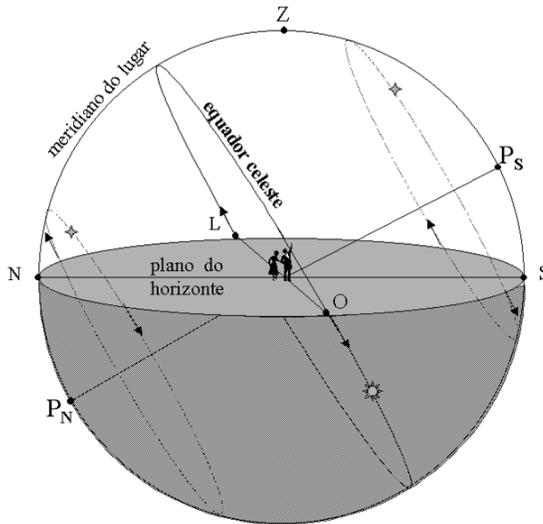


Figura 6 – Visão topocêntrica da Esfera Celeste a partir de um local no hemisfério sul da Terra. (Fonte: Elaboração do autor.)

O QUE É ZÊNITE?

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

1.5 Estações do ano

1.5.1 Movimento anual do Sol e Eclíptica

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

O movimento anual do Sol define então no céu uma trajetória circular (veja a Figura 10). Tal trajetória aparente foi denominada ‘Eclíptica’, porque é onde a Lua se encontra na ocasião de um eclipse (vide Subseção DURAÇÃO E PERIODICIDADE DOS ECLIPSES). O plano dessa trajetória circular anual do Sol é inclinado em relação ao plano do Equador Celeste, em cerca de $23^\circ,5$ (como ilustrado na Figura 7). O plano da Eclíptica define o plano da órbita da Terra em torno do Sol. Então, o círculo da Eclíptica simplesmente corresponde à projeção do plano orbital da Terra na Esfera Celeste. Ao longo da direção da Eclíptica no céu, foram concebidas, pelos povos antigos da Mesopotâmia, as constelações do Zodíaco, associadas a lendas e mitos desses povos (leia também ANO SOLAR E LUNAÇÃO, na Seção PERCEPÇÃO E CONTAGEM DO TEMPO).

1.5.2 Solstícios e Equinócios

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

A Figura 7 ilustra esquematicamente a Terra em quatro ocasiões especiais de sua órbita ao redor do Sol. São os dias em que ocorrem os Solstícios e Equinócios.

Tomemos como referência o hemisfério sul da Terra. Na posição 1 da Figura 7, fixando nossa visão a partir da Terra, o Sol está na distância angular máxima ao norte do plano do Equador Celeste, parecendo parar na Esfera Celeste para depois retroceder, para o sul, em seu movimento anual aparente. Os raios solares, nessa época do ano, incidem mais obliquamente sobre a superfície do hemisfério sul da Terra, de forma que a incidência de calor é menor. Esse dia é denominado Solstício do Inverno Austral (Solstício significa Sol parado; em latim: *solstitium*), o qual ocorre por volta de 22 de junho. A noite do Solstício do Inverno Austral é a mais longa do ano. A partir do Solstício de Inverno, tanto os “dias claros” como os dias civis e astronômicos voltam a aumentar de duração, lentamente.

De modo análogo, na posição 3 (Figura 7), quando ocorre o “dia claro” mais longo do ano para o hemisfério sul, o Sol atinge a posição angular mais ao sul do Equador Celeste. É o dia do Solstício do Verão Austral, que ocorre por volta de 21 de dezembro. No Verão, a incidência dos raios solares acontece de forma menos oblíqua à superfície. Em lugares próximos ao Trópico de Capricórnio, a incidência é quase perpendicular. Portanto, a insolação é maior. Após o Solstício de Verão, os “dias claros” se tornam cada vez mais curtos novamente.

Nas posições intermediárias 2 e 4 (Figura 7), o “dia claro” e a noite têm a mesma duração (isso ocorre para todo o globo terrestre). São os dias dos Equinócios de Primavera e Outono, que ocorrem,

respectivamente, em torno de 22 de setembro e 21 de março no hemisfério sul. A palavra Equinócio, de origem latina, significa noites de iguais duração. Os Equinócios ocorrem quando o Sol está na direção do Equador Celeste, deslocando-se do hemisfério celeste norte para o sul, no caso do Equinócio da Primavera Austral, e fazendo o caminho inverso, no Equinócio do Outono Austral. Nesses dias, ambos os hemisférios terrestres recebem a mesma quantidade de insolação. Entre o início do Outono Austral e o fim do Inverno, os “dias claros” são mais curtos do que as noites (a noite mais longa ocorre no início do Inverno); entre o início da Primavera e o fim do Verão, a situação se inverte (o dia mais longo ocorre no início do Verão).

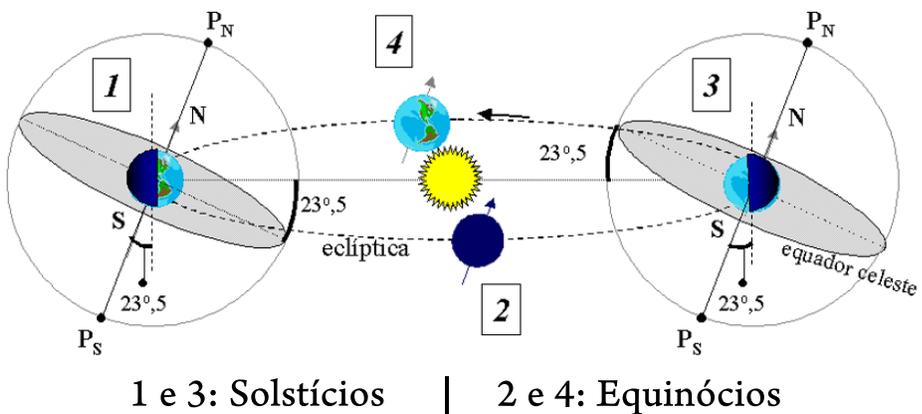


Figura 7 – O início das estações do ano por meio das perspectivas heliocêntrica e geocêntrica (a ilustração está fora de escala). (Fonte: Elaboração do autor.)

Sequencialmente, para o hemisfério sul da Terra, tem-se: o Equinócio de Outono, em 20 ou 21 de março, o Solstício de Inverno, entre 21 e 23 de junho, o Equinócio de Primavera, em 22 ou 23 de setembro, e o Solstício de Verão, entre 21 e 23 de dezembro. As estações do ano acontecem de forma inversa em cada um dos hemisférios terrestres. Enquanto é Verão no hemisfério sul, é Inverno no hemisfério norte.

A fim de complementar o entendimento sobre estações do ano, vamos analisar o nascer e pôr do Sol nos dias dos Equinócios e Solstícios, como representado na Figura 8, para um local na região tropical do hemisfério sul (entre o Equador e o Trópico de Capricórnio). Ignora-se o movimento anual aparente do Sol nesta análise.

Somente nos Equinócios, o Sol surge no Horizonte exatamente a partir do Ponto Cardeal Leste, deslocando-se ao longo do dia sobre o Equador do céu e escondendo-se, exatamente também, no Ponto Cardeal Oeste (isso ocorre para quase toda a Terra; as exceções são os polos geográficos). Os Solstícios são os dias quando o Sol mais se distancia dos Pontos Cardiais Leste e Oeste, no nascer e ocaso, respectivamente. No Solstício do Verão Austral, o Sol surge mais ao sul do Ponto Leste e esconde-se, com o mesmo distanciamento, ao sul do Ponto Oeste. No Solstício do Inverno Austral, o Sol nasce com o maior afastamento angular ao norte do Ponto Leste e põe-se, com o mesmo distanciamento, ao norte do Ponto Oeste. Peço ao leitor ou leitora para notar que as elevações máximas do Sol no céu são bem diferentes entre o dia do Solstício do Verão e o dia do Solstício do Inverno, as quais produzem insolações bem distintas entre si.

Como ilustrado também na Figura 8, o distanciamento angular máximo que a direção do Sol pode assumir em relação ao Equador Celeste é exatamente igual à inclinação entre o plano da Eclíptica e o plano do Equador ($\approx 23^{\circ},5$).

As separações angulares entre o nascer do Sol e o Ponto Cardeal Leste e entre o pôr do Sol e o Ponto Cardeal Oeste num dia qualquer do ano, ambas medidas no Círculo do Horizonte, dependem da latitude do lugar e da declinação do Sol nesse dia (variável de acordo com a data). Apenas nos dias dos Equinócios é que esses ângulos se anulam. Especificamente no dia de cada Solstício, o ângulo somente coincide com a obliquidade da Eclíptica ($\approx 23^{\circ},5$) para localidades ao longo do Equador da Terra.

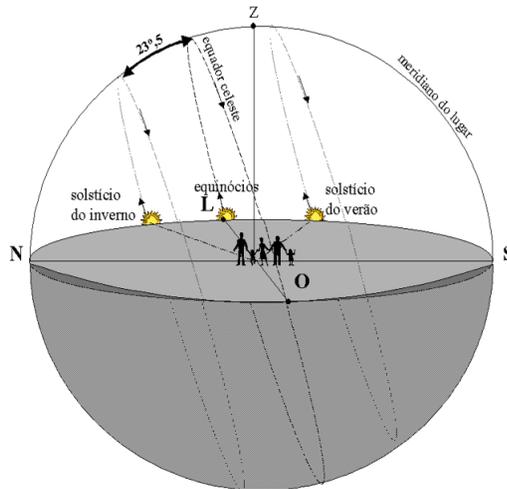


Figura 8 – Visão topocêntrica do nascer do Sol nos Solstícios e Equinócios para um lugar tropical do hemisfério sul da Terra). (Fonte: Elaboração do autor.)

SOL A PINO E TRÓPICOS

Somente para localidades internas à região tropical da Terra (também conhecida como região equatorial), o Sol pode ficar a pino em sua passagem meridiana diária (que ocorre ao meio-dia ou às 12h em hora solar verdadeira local, o 'meio-dia' do Dia Solar Verdadeiro Local). Entre as linhas dos trópicos, isto acontece duas vezes por ano, como ilustrado no caso da Figura 8, e os dias correspondentes são determinados pela latitude do lugar. Para locais situados exatamente sobre um dos trópicos, o Sol cruza a pino o Meridiano Local somente uma vez ao ano, ou seja, no Solstício de Verão. Já para quaisquer locais ao longo do Equador Terrestre, o Sol cruza a pino o Meridiano Local somente nos dias dos Equinócios. Os Trópicos de Capricórnio e Câncer são nomeados dessa maneira porque durante os Solstícios, na Antiguidade, o Sol se encontrava na direção dessas constelações zodiacais.

1.5.3 Inclinação do eixo de rotação da Terra

O ângulo formado entre o eixo de rotação da Terra e a perpendicular do plano da Eclíptica é exatamente igual à separação angular entre os planos do Equador e da órbita da Terra. A Figura 7 ilustra a inclinação do eixo de rotação da Terra, também denominada obliquidade da Eclíptica.

Na época atual, a inclinação entre o plano do Equador e o da Eclíptica é de aproximadamente $23^{\circ},5$ (precisamente $23^{\circ} 26' 21''$ no ano 2000.0). Se, por acaso, a inclinação fosse 0° , ou seja, a Terra girasse com o seu eixo perpendicularmente ao seu plano orbital (o plano da Eclíptica), todos os “dias claros” e as noites apresentariam sempre a mesma duração (12 h); seria um eterno Equinócio (os planos da Eclíptica e do Equador coincidiriam). O Sol sempre estaria na direção do Equador Celeste e as estações (astronômicas) do ano não existiriam de fato.

A inclinação do eixo de rotação da Terra muda com o tempo, pois esta se movimenta de modo análogo a um pião que gira obliquamente ao chão. Um dos movimentos do eixo rotacional da Terra, denominado precessão dos Equinócios, faz o eixo girar em torno da perpendicular da Eclíptica no sentido oposto ao de sua rotação, seguindo um período de cerca de 25.800 anos. Outro movimento do eixo rotacional terrestre, chamado nutação, faz o ângulo dessa inclinação oscilar em torno de um valor médio. Ambos os movimentos são determinados basicamente pela interação gravitacional da Lua e do Sol sobre a Terra, em função desta girar em torno de si com a sua região equatorial não coincidente tanto com o seu plano orbital (direção do Sol) quanto com o plano de órbita da Lua (direção da Lua).

Além do mais, o planeta Terra, por não ser um corpo rígido, ao girar em torno de si e também sofrer forças gravitacionais diferenciais de maré da Lua e do Sol, deixa de ser representada por uma esfera perfeita, tal que sua região equatorial fica mais bojuda do que o diâmetro polar. Veja também a Seção MARÉS DOS OCEANOS, que

apresenta uma explicação sucinta acerca das forças gravitacionais de maré da Lua e do Sol sobre os oceanos terrestres.

O movimento de precessão produziria uma modificação lenta e gradual nas datas dos Solstícios e Equinócios, antecipando-as, caso a correção correspondente não fosse aplicada ao Sistema de Coordenadas Celestes Equatoriais. Com relação às observações astronômicas, esses movimentos alteram lentamente as coordenadas equatoriais dos astros, em virtude de modificarem a direção dos polos celestes.

Hiparco, astrônomo da Antiga Grécia (200 a.C.), já havia notado os efeitos da precessão dos Equinócios, ao comparar as suas medidas de posição de estrelas com outras feitas tempos atrás.

Para a Astrologia, esses movimentos não são levados em conta, provocando inclusive uma separação gradual entre a posição dos signos e suas respectivas constelações originais. Por exemplo, o autor deste capítulo, que nasceu num certo dia do mês de maio, é do signo de Gêmeos segundo à Astrologia, mas o Sol nessa data do ano contemporaneamente se apresenta na direção da constelação de Touro.

1.5.4 Geocentrismo, Heliocentrismo e Translação

Do ponto de vista terrestre (visão geocêntrica), o Sol parece completar uma volta em torno da Terra em um ano. O mesmo ocorre com a Lua e os planetas, só que em períodos distintos. Todos esses astros têm movimentos anuais aparentes com trajetórias próximas à trajetória do Sol, no mesmo sentido do movimento solar (de oeste para leste). Daí a origem do modelo geocêntrico, que tentou explicar os movimentos desses astros errantes por entre as constelações zodiacais; todos deslocando-se em torno da Terra imóvel. O geocentrismo perdurou até surgir o heliocentrismo, que explicava de forma mais simples alguns movimentos “estranhos” que os planetas realizavam no céu. Esses movimentos peculiares dos planetas

faziam-nos retroceder à sua trajetória padrão oeste-leste, alguns deles traçando até mesmo pequenas trajetórias em forma de laços.

O modelo heliocêntrico de Nicolau Copérnico (1473-1543) associado à Teoria da Gravitação Universal de Isaac Newton (1643-1727), de modo elegante e convincente, explicam e descrevem como a Terra e os demais planetas orbitam o Sol, seguindo órbitas elípticas em torno deste (mais detalhes no Capítulo O SISTEMA SOLAR Solar, Seção 'A evolução do conhecimento sobre o Sistema Solar e um pouco de dinâmica'). O movimento de translação ou revolução da Terra ao redor do Sol acontece num plano, aquele da Eclíptica. A órbita da Terra é uma elipse bem pouco excêntrica (quase circular, de fato). Em primeira aproximação, o Sol ocupa um dos focos da elipse, como representado na Figura 9. Na verdade, a Terra revoluciona em torno do centro de massa do Sistema Solar. A translação/revolução da Terra pode ser chamada de movimento orbital. A velocidade orbital média de nosso planeta Terra é de cerca de 107.000 km/h (≈ 30 km/s). Definitivamente, nós não estamos imóveis no Universo.

O movimento de revolução da Terra ocorre no mesmo sentido da rotação terrestre (de oeste para leste). Aplica-se a regra da mão direita a fim de visualizá-lo.

A velocidade da revolução terrestre foi obtida por medida direta astronômica em 1729 com os trabalhos do físico inglês James Bradley, o qual visava medir distâncias de estrelas. Bradley observou algo inesperado: a direção das estrelas sofria um desvio sistemático e cíclico. A razão é dada pela combinação da velocidade orbital da Terra com a da luz (≈ 300.000 km/s), nomeada de aberração da luz (no caso, aberração anual da luz dos astros).

Alguém poderia afirmar que as estações do ano decorrem da variação da distância da Terra ao Sol, em função da órbita da Terra ser elíptica (este é outro exemplo de concepção espontânea equivocada que podemos ter). Contudo, essa pessoa deve lembrar que as estações ocorrem alternadamente em ambos os hemisférios terrestres. Mesmo que a variação na distância Terra-Sol acarrete peque-

nas alterações no fluxo de luz solar recebido pela Terra, o qual de fato aumenta em 6,5% entre as posições orbitais extremas do afélio e periélio, não há consequências maiores para a insolação e climas entre os dois hemisférios. Quando é Verão no hemisfério sul, a Terra encontra-se mais próxima do Sol do que quando é Verão no hemisfério norte (Figura 9), mas nem por isso o Verão é mais intenso no hemisfério sul.

ANO SIDERAL

O intervalo de tempo que a Terra leva para revolucionar completamente em torno do Sol depende do referencial assumido. No caso do ano solar, a referência é o próprio Sol (i.e. em 1 ano solar, o Sol perfaz seu movimento anual aparente completo ao longo da Eclíptica tendo como referência o Ponto Gama, mas não fechando exatamente um círculo de 360°). Já o ano sideral é o intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas da Terra pelo mesmo ponto de sua órbita, dado em referência às estrelas. Enquanto o ano solar tem 365,2422 dias (solares), o ano sideral tem 365,25636 dias (solares); ou seja, o ano solar é mais curto em cerca de 20 minutos devido à precessão retrógrada do eixo de rotação da Terra, de leste para oeste, que faz o Ponto Gama (que é uma intersecção entre o Equador Celeste e a Eclíptica) se deslocar no sentido de encontro ao Sol, enquanto este perfaz o seu movimento anual aparente de oeste para leste ao longo da Eclíptica. Você poderia perguntar agora: – *Por que então não se adota o ano sideral no calendário?* Simplesmente, porque os inícios das estações do ano são determinados pelo ano solar e não pelo ano sideral. Se usássemos o ano sideral, a cada 72 anos as estações do ano começariam um dia mais cedo, pois estaríamos acrescentando um dia ($20 \text{ minutos/ano} \times 72 \text{ anos} = 24 \text{ horas}$). Com o passar dos anos, a diferença entre o início real de uma estação e o seu início no calendário aumentaria, chegando a 1 mês após 2.160 anos.

UNIDADE ASTRONÔMICA

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

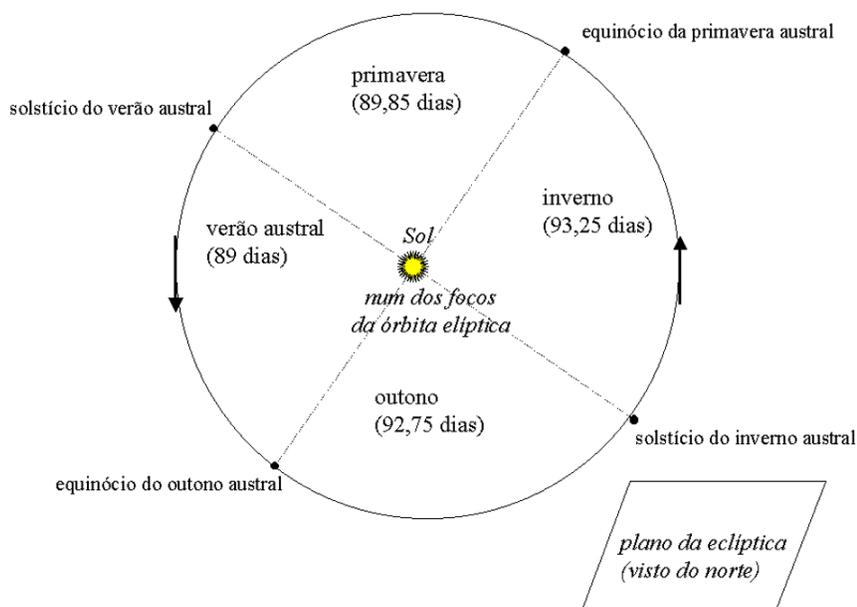


Figura 9 – A revolução da Terra em torno do Sol (vista do norte da Eclíptica), com os inícios das estações do hemisfério sul assinalados (ilustração fora de escala). (Fonte: Elaboração do autor.)

1.5.5 Aspectos do céu em diferentes estações

Um observador na superfície da Terra (perspectiva topocêntrica), percebe o Sol atravessar as constelações zodiacais anualmente, como se pode entender ao vermos a Figura 10 (que ilustra na

verdade a perspectiva heliocêntrica conjugada com a geocêntrica a fim de associar a revolução da Terra ao redor do Sol ao movimento anual aparente do Sol ao longo da Eclíptica).

Imagine que o céu seja um gigantesco balão esférico, de tal modo que os polos celestes são os dois pontos de encontro de todos os 20 gomos de largura de 18° cada. O Sol estaria no centro desse balão e a Terra (com rotação diária) transladaria dentro do balão ao redor do Sol central (como na Figura 10). Quando o Sol se dispõe na direção de uma determinada constelação do Zodíaco, esta constelação, por vezes as constelações adjacentes a leste e/ou oeste, e algumas outras vizinhas ao norte e ao sul não podem ser visualizadas. Na prática, uma área na Esfera Celeste centrada no Sol com lados nas direções leste-oeste e norte-sul de cerca de 18 graus de largura em cada direção (respectivamente nas direções de ascensão reta e de declinação, se usarmos as Coordenadas Celestes Equatoriais) não é visualizada devido ao ofuscamento pelo Sol; mais precisamente devido ao espalhamento da luz solar na atmosfera terrestre. A faixa em ascensão reta ofuscada pelo Sol corresponderia ao gomo do balão que estivesse na direção do Sol. Consequentemente, todos os demais “gomos” do céu poderiam ser observados ao longo da noite. O “gomo” celeste diametralmente oposto àquele ofuscado pelo Sol seria avistado preferencialmente à meia-noite. Vale lembrar que a extensão (norte-sul) visível de cada “gomo” celeste avistado seria dependente basicamente da latitude da posição do observador na Terra (veja ASPECTOS DO CÉU EM DIFERENTES LATITUDES, na Seção DIAS E NOITES). A partir de regiões na Terra ao longo do Equador, poderíamos observar praticamente toda extensão de cada “gomo”. A partir do hemisfério sul da Terra, observaríamos preferencialmente a extensão sul dos “gomos”, e vice-versa para o hemisfério norte.

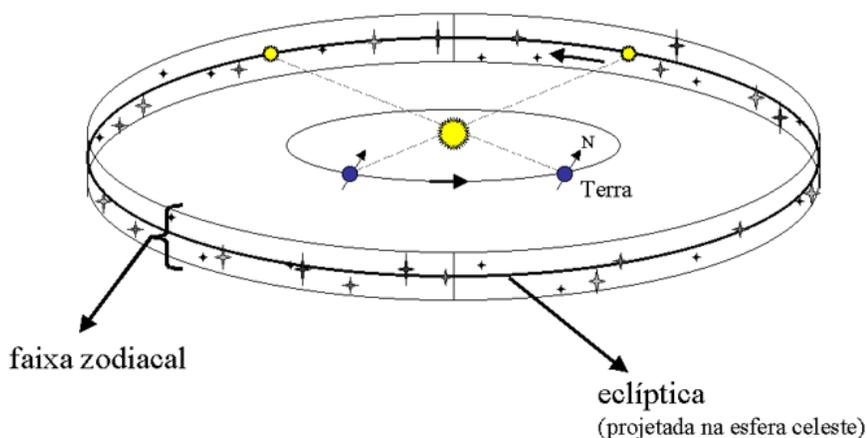


Figura 10 – Movimento aparente anual do Sol por entre as constelações zodiacais devido à revolução da Terra ao redor do Sol (ilustração fora de escala). (Fonte: Elaboração do autor.)

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

Na Tabela 1, são apresentadas as constelações mais fáceis de serem identificadas quanto à localização delas na Esfera Celeste para o meio de cada estação. As constelações do Zodíaco são listadas conforme suas disposições de leste para oeste no céu.

Tabela 1 – Constelações de destaque, visíveis por estação do ano para o hemisfério sul. A(s) estrela(s) mais brilhante(s), facilmente vista(s) a olho nu, é(são) também apresentada(s) entre parênteses para algumas dessas constelações. (Fonte: Elaboração do autor.)

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

CONSTELAÇÕES ZODIACAIS

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

As Figuras 11 a 14 mostram as configurações projetadas do céu, para a cidade de São José dos Campos (SP) às 21h de um dia próximo ao meio de cada estação do ano. Para utilizar essas cartas celestes sazonais com o intuito de reconhecimento do céu noturno, você deve segurá-las acima de sua cabeça fazendo coincidir as direções N-S e L-O com a orientação geográfica local (é preferível ficar de frente para o Sul).

1. **PARÁ**
Spica (α *Virginis*)
2. **AMAZONAS**
Procyon (α *Canis Minoris*)
3. **MATO GROSSO DO SUL**
Alphard (α *Hydrae*)
4. **ACRE**
Dhanab al Shuja (γ *Hydrae*)
5. **MATO GROSSO**
Sirius (α *Canis Majoris*)
6. **AMAPÁ**
Mirzam (β *Canis Majoris*)
7. **RONDÔNIA**
Mulphen (γ *Canis Majoris*)
8. **RORAIMA**
Wezen (δ *Canis Majoris*)
9. **TOCANTINS**
Adhara (ϵ *Canis Majoris*)
10. **GOIÁS**
Canopus (α *Carinae*)
11. **BAHIA**
Gacrux (γ *Crucis*)
12. **MINAS GERAIS**
Pálida (δ *Crucis*)
13. **ESPIRITO SANTO**
Intrometida (ϵ *Crucis*)
14. **SÃO PAULO**
Acrux (α *Crucis*)



15. **RIO DE JANEIRO**
Mimosa (β *Crucis*)
16. **PIAUI**
Antares (α *Scorpii*)
17. **MARANHÃO**
Graffias (β *Scorpii*)
18. **CEARÁ**
Wei (ϵ *Scorpii*)
19. **RIO GRANDE DO NORTE**
Shaula (λ *Scorpii*)
20. **PARAIBA**
Girtab (κ *Scorpii*)
21. **PERNAMBUCO**
Denebakrab (μ *Scorpii*)
22. **ALAGOAS**
Sargas (θ *Scorpii*)
23. **SERGIPE**
Apollyon (ι *Scorpii*)
24. **SANTA CATARINA**
 δ *Trianguli Australis*
25. **RIO GRANDE DO SUL**
Atria (α *Trianguli Australis*)
26. **PARANÁ**
 γ *Trianguli Australis*
27. **DISTRITO FEDERAL**
Polaris Australis (σ *Octantis*)

BANDEIRA NACIONAL

A bandeira da República Federativa do Brasil possui um círculo azul estrelado. As estrelas representam os 26 estados brasileiros e o Distrito Federal, e estão dispostas numa configuração espelhada para o céu da cidade do Rio de Janeiro, no momento da Proclamação da República (às 8h30min do dia 15 de novembro de 1889). Em especial, podemos visualizar a constelação do Cruzeiro do Sul (invertida da esquerda para direita), como hipoteticamente seria vista de fora da Esfera Celeste. Fonte: wikipedia.en (imagem de domínio público).

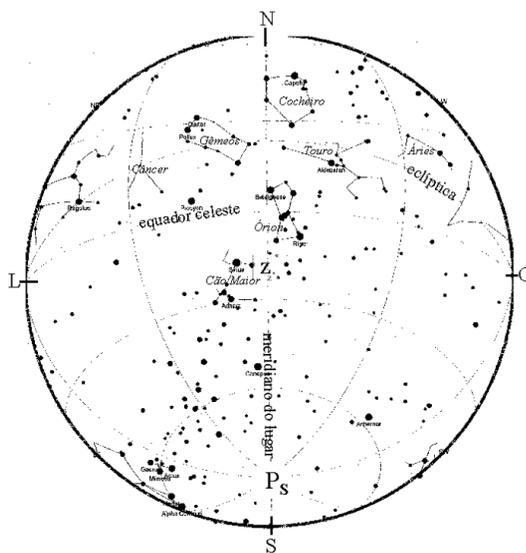


Figura 11 – Projeção do céu para São José dos Campos – SP, às 21h, para o meio do verão. (Fonte: Elaboração do autor.)

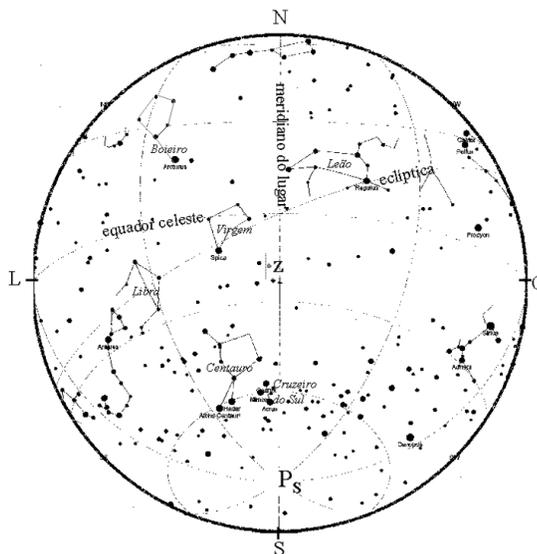


Figura 12 – Projeção do céu para São José dos Campos – SP, às 21h, para o meio do outono. (Fonte: Elaboração do autor.)

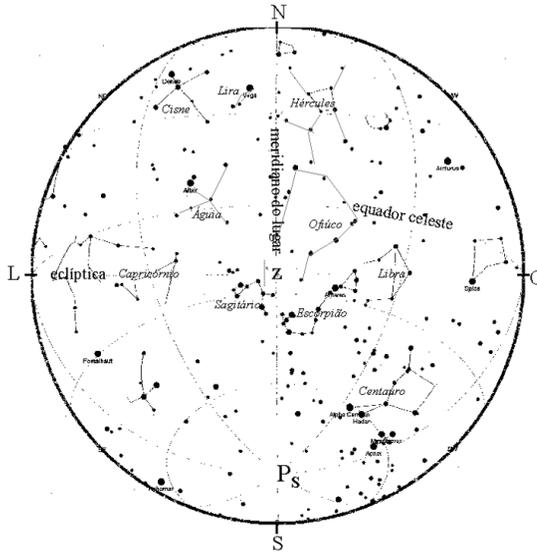


Figura 13 – Projeção do céu para São José dos Campos – SP, às 21h, para o meio do inverno. (Fonte: Elaboração do autor.)

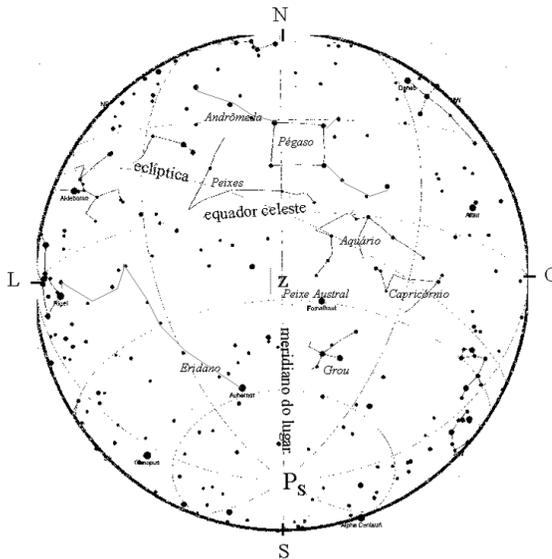


Figura 14 – Projeção do céu para São José dos Campos – SP, às 21h, para o meio da primavera. (Fonte: Elaboração do autor.)

1.6 Fases da Lua

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

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

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

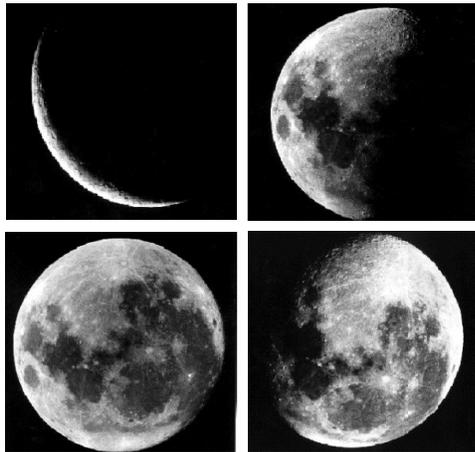


Figura 15 – A Lua em fases distintas. (Fonte: Fotografias de André Milone, no Observatório do Valongo – UFRJ. Rio de Janeiro, 1988.)

1.6.1 Astros luminosos e iluminados

O Sol, assim como as demais estrelas, é um astro que nas regiões centrais produz energia por meio de reações termonucleares e emite ao meio externo um fluxo de radiação eletromagnética em vários comprimentos de onda (leia os Capítulos ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL, O SOL e A VIDA DAS ESTRELAS); ou seja, as estrelas são fontes de ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama, em ordem crescente de energia luminosa.

A Lua, os planetas (incluindo a Terra) e os corpos menores do Sistema Solar, por outro lado, são astros iluminados pelo Sol (embora também emitam radiação eletromagnética por terem temperatura superficial diferente do zero absoluto). A Lua e os planetas são visualizados por nós, seres humanos, simplesmente porque refletem a luz visível solar incidente. A superfície da Lua reflete cerca de 7% do total da luz solar incidente.

1.6.2 Translação ou revolução da Lua

O intervalo de tempo que a Lua gasta para completar uma volta completa em torno do centro de massa do sistema Terra-Lua, em relação ao referencial das estrelas, é chamado de período orbital sideral da Lua; é igual a 27 dias, 7 horas, 43 minutos e 12 segundos (dias solares, horas solares, etc.). Já o intervalo de tempo entre duas fases iguais sucessivas (ex.: duas fases cheias) é denominado período orbital sinódico da Lua ou, simplesmente, lunação; que é relativo ao referencial solar. Uma lunação dura 29 dias, 12 horas, 44 minutos e 3 segundos (dias solares, horas solares, etc.), cerca de 29 dias e meio. É a base dos calendários lunares. Veja também a Seção ANO SOLAR E LUNAÇÃO.

O movimento orbital da Lua (ao redor da Terra, em primeira aproximação) é realizado no mesmo sentido dos movimentos orbital

e rotacional da Terra, ou seja, ocorre de oeste para leste. É fácil perceber isso: a Lua sempre “nasce” cerca de 50 minutos mais tarde, dia após dia, em consequência de seu movimento de oeste para leste. Aplicando-se novamente a regra da mão direita com o polegar para cima apontando para o norte, tem-se que a Lua translada ao redor da Terra no mesmo sentido que a Terra translada ao redor do Sol. A Figura 16 ilustra o movimento de translação da Lua.

A órbita da Lua não é circular, mas, sim, elíptica, de modo que num dos focos da elipse se localiza o centro de massa do sistema Terra-Lua e não o centro da Terra como se poderia pensar. A distância entre os centros da Lua e Terra varia de 357.300 km a 407.100 km, apresentando um valor médio de 384.400 km. A velocidade média de translação da Lua fica em torno de 3.700 km/h.

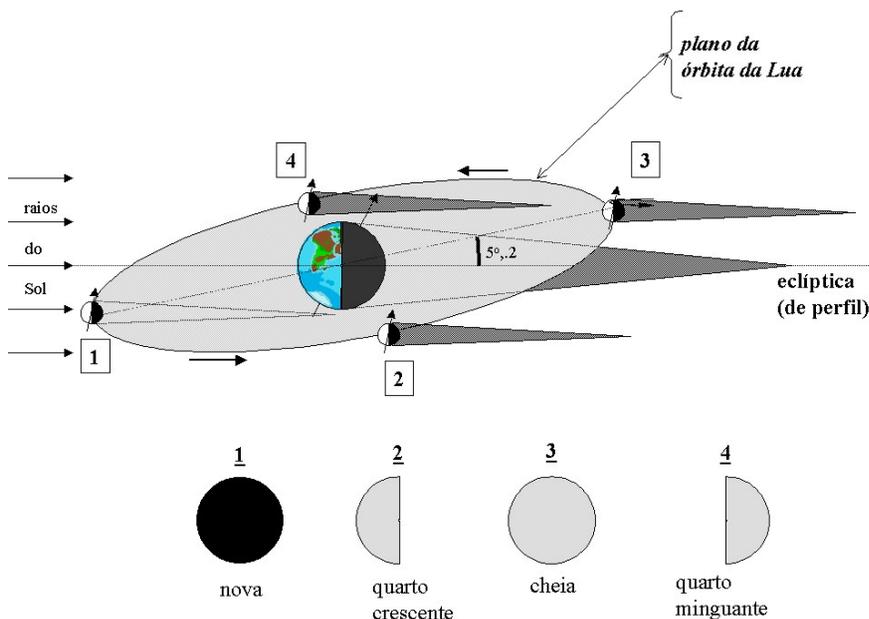


Figura 16 – A translação da Lua: suas fases principais como são vistas do hemisfério sul da Terra (ilustração fora de escala). (Fonte: Elaboração do autor.)

O QUE É CENTRO DE MASSA?

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

1.6.3 Rotação da Lua e sua face oculta

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

O movimento rotacional da Lua também ocorre no mesmo sentido do seu movimento orbital. Pode-se usar a regra da mão direita para a sua visualização. A seta sobre a Lua, na Figura 16, ilustra o Polo Norte de rotação; seria o polegar da mão direita.

A face “oculta” é a parte da Lua que não podemos avistar a partir da superfície terrestre (Figura 17). Em virtude de o movimento orbital da Lua estar sincronizado com sua rotação (em 1:1), por questão de equilíbrio dinâmico evolutivo, a Lua tem sempre a mesma face voltada para a Terra. O período rotacional sideral da Lua é igual ao seu período sideral de revolução ao redor da Terra, isto é, o Dia

Sideral da Lua dura exatamente 27 dias, 7 horas, 43 minutos e 12 segundos (em unidades de dias solares, horas solares, etc.).

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

Enquanto o Dia Solar da Lua tem duração igual a uma lunação, pois o Sol é tomado como referência, o Dia Sideral da Lua corresponde ao seu período sideral de rotação, como já afirmado, ou igual ao seu período orbital sideral, devido à sincronização órbita-rotação. A lunação é mais longa do que o período sideral de revolução da Lua pelo mesmo motivo que, na Terra, o Dia Solar é maior do que o Dia Sideral; isto é, a Lua ao girar em torno de si e ao redor da Terra, sendo ambos movimentos de oeste para leste, ela acompanha a revolução da Terra em torno do Sol, que também ocorre no mesmo sentido de oeste para leste.

DEMONSTRE A SINCRONIA DOS MOVIMENTOS LUNARES

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

1.6.4 Aspectos das fases lunares

Na fase de quarto crescente, a Lua está com uma metade de seu hemisfério iluminado voltada para a Terra. Em certas ocasiões, com a forma parecida com a de um C para o hemisfério sul. Na fase cheia, toda a sua parte iluminada está voltada para a Terra. No quarto minguante, a Lua está com a outra metade de seu hemisfério iluminado voltada para a Terra; forma parecida com um D para o hemisfério sul, em determinadas vezes. Finalmente, na fase nova, é a sua parte não-iluminada pelo Sol que fica voltada para a Terra (não conseguimos ver a Lua!). A Figura 16 mostra a Lua nessas quatro fases principais.

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

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

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

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

**CURIOSIDADE:
DIREÇÃO DO SOL E FASE CHEIA DA LUA**

Obviamente, a face iluminada da Lua aponta sempre para a direção do Sol. É interessante reparar que em muitas montagens fotográficas, exibindo a Lua no céu, há frequentemente equívocos astronômicos como aqueles que mostram a Lua cheia próxima a um Horizonte crepuscular. Isto é impossível acontecer, porque a Lua cheia sempre surge no horizonte do lado oposto ao do pôr do Sol.

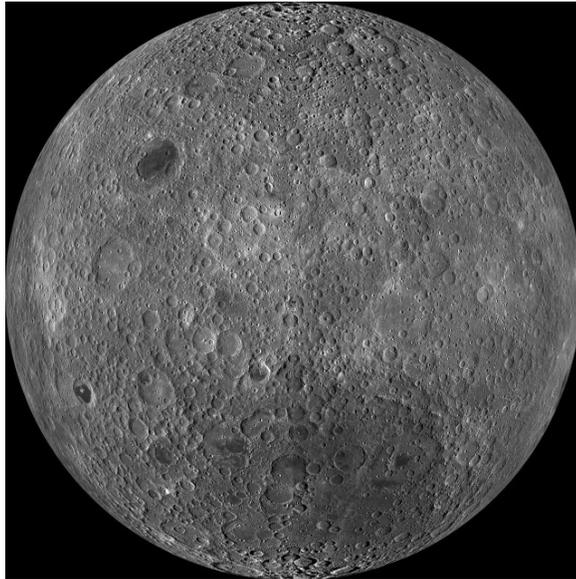


Figura 17 – A face oculta da Lua, como fotografada pelo Lunar Reconnaissance Orbiter (Orbitador de Reconhecimento Lunar, LRO) da NASA dos EUA (National Aeronautics and Space Administration; Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) (Fonte: Lunar Reconnaissance Orbiter.)

1.7 Eclipse da Lua e do Sol

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

No Egito Antigo (alguns séculos antes de Cristo), os eclipses do Sol eram explicados como sendo ataques de uma serpente ao barco que transportava o Sol pelo céu.

Os antigos chineses (800 a.C.) costumavam observar sistematicamente os fenômenos celestes. Registraram e previram diversos eclipses. Pensavam que um imenso dragão estivesse engolindo o Sol durante um eclipse solar. Então, faziam muito barulho para assustar o dragão e o Sol sempre reaparecia. Nunca falhava!

1.7.1 Distâncias e dimensões do sistema Sol–Terra–Lua

O tamanho aparente da Lua compreende um ângulo de aproximadamente 0,5 grau. Por pura coincidência, na época atual, é semelhante ao tamanho angular do Sol. Desse modo, os dois parecem iguais em tamanho, porém não o são. Nota-se que a Lua está 400 vezes mais próxima da Terra do que o Sol, o qual é cerca de 400 vezes maior em diâmetro.

A distância Terra-Sol em função da distância Terra–Lua foi estimada por Aristarco de Samos (300 a.C.). Ele observou simultaneamente a Lua em quarto crescente e o pôr do Sol. Quando o Sol estava no Horizonte, Aristarco mediu a separação angular entre a Lua e o Sol, a qual representa um dos ângulos do triângulo retângulo Terra–Lua–Sol (Figura 18), cujo vértice do ângulo reto (90°) é a Lua. O ângulo medido ficou em torno de 87° , proporcionando uma distância Terra-Sol, $d(\text{Terra-Sol})$, de aproximadamente 7.300.000 km, isto é, por volta de apenas 19 vezes a distância média Terra–Lua, $d(\text{Terra–Lua})$, que é muito menor do que o valor real: $d(\text{Terra–Sol}) \approx 382 d(\text{Terra–Lua})$.

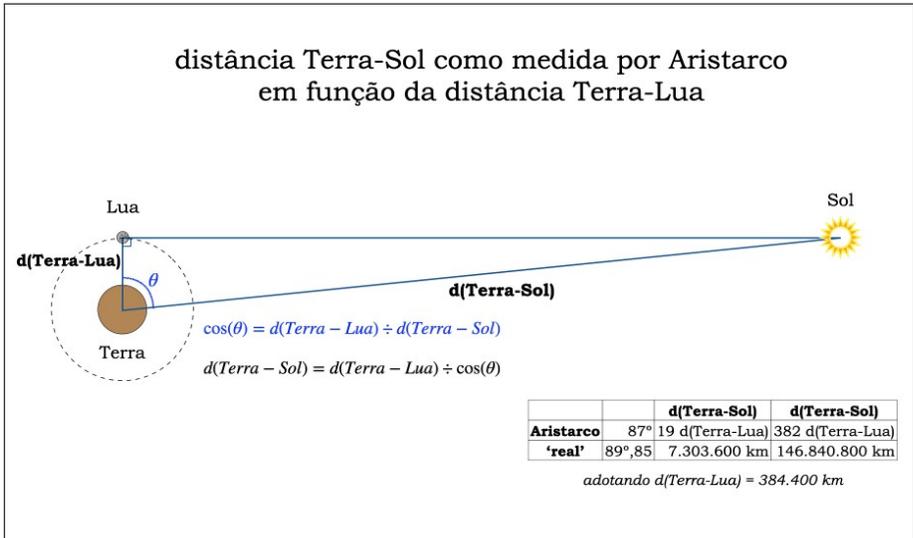


Figura 18 – Cálculo da distância Terra-Sol feito por Aristarco (300 a.C.) (Fonte: Elaboração do autor.)

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

Tabela 2 – Alguns dados físicos do Sol, da Terra e da Lua (Fonte: Elaboração do autor.)

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

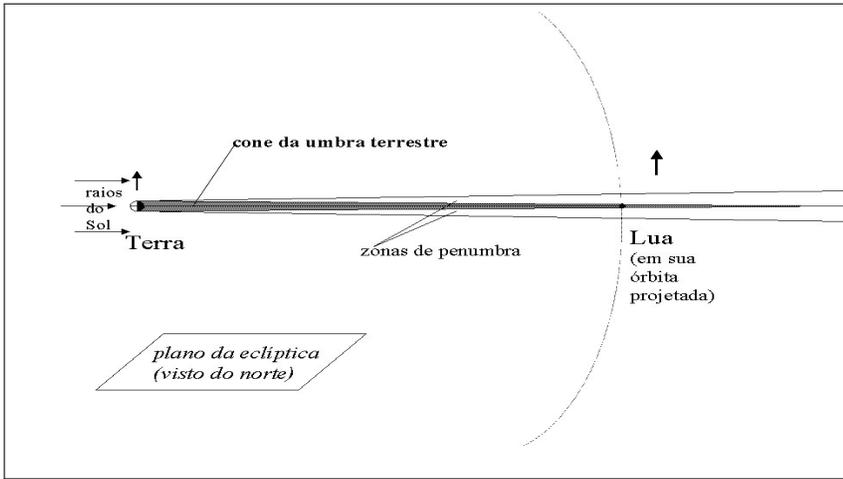


Figura 19 – Ilustração em escala de um eclipse total da Lua
(Fonte: Elaboração do autor.)

A Figura 19 esquematiza a ocorrência de um eclipse total da Lua. A Terra e a Lua estão representadas em tamanhos relativos proporcionais. Se a Terra tivesse 2 mm de diâmetro (conforme mostrado na Figura 19), a Lua deveria ter, aproximadamente, 0,25 mm de diâmetro. A distância Terra-Lua (≈ 6 cm) e a trajetória da Lua em volta da Terra também são representadas em dimensões proporcionais. O Sol seria, nessa mesma escala relativa, uma esfera com aproximadamente 20 cm de diâmetro e estaria a uma distância cerca de 24 m à esquerda deste livro. O plano da órbita da Lua (em torno da Terra) não coincide com o plano da órbita da Terra (em torno do Sol). A órbita da Lua está apenas projetada na folha de papel, que está representando o plano da órbita da Terra (o plano da Eclíptica). Desse modo, a trajetória da Lua está atravessando o papel na região da sombra da Terra (isto é, a Lua cheia está cruzando o plano da Eclíptica na ocasião do eclipse lunar).

1.7.2 Tipos de eclipse

O Sol é uma fonte luminosa extensa. Tanto a Lua como a Terra projetam no espaço uma sombra em forma de um cone denominada umbra, cuja base é o próprio corpo, e uma penumbra, que se abre no espaço atrás do corpo iluminado e que envolve a umbra (o cone da umbra, então, situa-se interno à penumbra). Por definição, o cone umbral é a região da sombra que não recebe nenhuma luz solar direta; a penumbra, a região que recebe luz solar de modo parcial.

No entanto, para a Terra, que possui uma atmosfera superficial, os limites do seu cone umbral e de sua penumbra não são bem definidos. A luz do Sol é refratada e espalhada quando atravessa a atmosfera terrestre, fazendo com que o cone umbral da Terra não seja totalmente escuro, porém iluminado de forma difusa por mais luz vermelha do que azul. O mesmo não ocorre com a sombra da Lua.

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

Há três tipos de eclipse da Lua: o total, o parcial e o penumbral. O eclipse lunar total acontece quando a Lua adentra totalmente no cone de umbra da Terra; o parcial, quando somente parte da Lua atravessa o cone da umbra; e o penumbral, quando a Lua percorre apenas a zona da penumbra terrestre (é o menos pronunciável dos três). Na ocasião de um eclipse total ou parcial, a Lua percorre a região de penumbra antes e depois de atravessar o cone umbral da Terra (podendo entrar por completo ou parcialmente na umbra). A Figura 19 ilustra um eclipse total da Lua em escala.

Mesmo quando a Lua se situa completamente dentro da umbra terrestre durante um eclipse total, ela não é totalmente obscurecida em virtude de a luz solar ser espalhada pela atmosfera da Terra. Pode-se avistar a Lua, frequentemente, com uma coloração avermelhada em função do avermelhamento intenso da luz do Sol

pela atmosfera de nosso planeta (leia o Capítulo ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL).

Já os eclipses do Sol ocorrem quando a Lua em sua fase nova se coloca entre o Sol e a Terra, projetando sua sombra e/ou penumbra na superfície terrestre.

Os eclipses do Sol podem ser totais ou parciais.

Um eclipse solar total acontece quando a umbra da Lua projeta-se sobre a superfície terrestre, junto com sua penumbra também (veja a Figura 20). Da região da superfície da Terra por onde a umbra da Lua passa, o eclipse é observado realmente como total. Das regiões da Terra por onde somente a penumbra lunar passa, avista-se um eclipse solar parcial. Num eclipse solar total, os três astros se dispõem bem alinhados, isto é, Sol–Lua–Terra, nessa ordem.

Um eclipse solar parcial ocorre quando o disco do Sol é parcialmente “encoberto” pela Lua. Há somente a projeção da penumbra lunar sobre a Terra. Num eclipse parcial, os três astros não se encontram bem alinhados na ocasião (Sol–Lua–Terra).

Um tipo especial de eclipse parcial do Sol é o eclipse solar anular, que acontece devido a um maior distanciamento da Lua à Terra, em função da órbita da Lua ser uma elipse e não uma circunferência. Num eclipse solar anular, como num eclipse solar total, os três astros se encontram bem alinhados na ocasião da fase nova da Lua (Sol–Lua–Terra), mas o Sol não fica totalmente “encoberto” pela Lua, restando apenas um anel ou borda do disco solar não eclipsada. É visto como um eclipse solar anular apenas da faixa mais central da penumbra, sendo ainda observado como eclipse solar parcial de locais ao norte e ao sul desta faixa.

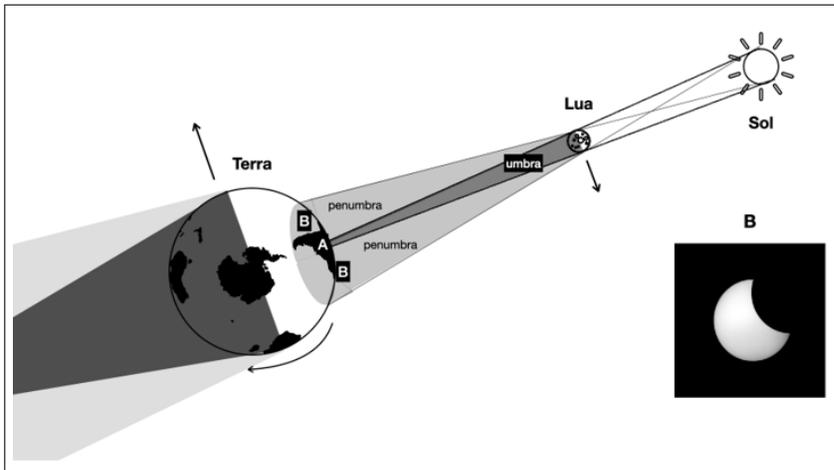


Figura 20 – Ilustração de um eclipse total do Sol (fora de escala) com fotografia feita a partir do ponto B de onde é avistado como parcial. (Fonte: Fotografia de André Milone, no Observatório do Valongo – UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.)

1.7.3 Duração e periodicidade dos eclipses

A extensão média do cone da sombra terrestre é 1.400.000 km. O diâmetro desse cone na distância média da Lua é de cerca de 9.000 km. A duração máxima da etapa umbral de um eclipse lunar é de 3 horas e 20 minutos. A duração da observação de um eclipse da Lua depende do intervalo de tempo que a Lua (em sua fase cheia) fica acima do Horizonte em uma dada localidade.

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

Alguém poderia questionar: – *Por que não há eclipses da Lua e do Sol em todos os meses, já que os eclipses lunares ocorrem na fase cheia da Lua e os solares na fase nova?* Porque a trajetória da Lua ao redor da Terra que ocorre num dado plano não coincide com o plano orbital da Terra (a Eclíptica). Se as órbitas da Lua e da Terra ficassem num

mesmo plano, todo mês haveria eclipses do Sol e da Lua. O eixo do cone da sombra terrestre situa-se no plano orbital da Terra. A inclinação entre o plano da órbita lunar e o plano da Eclíptica é de cerca de 5° (veja a Figura 16). Esse ângulo é pequeno, mas não pode ser desprezado. Na distância em que a Lua se encontra, ela frequentemente está fora do plano da órbita da Terra.

Em resumo, os eclipses só acontecem quando a trajetória da Lua atravessa a Eclíptica quando da ocasião da fase nova (eclipses do Sol) ou da fase cheia (eclipses da Lua). Daí surgiu a denominação Eclíptica, que deriva da palavra ‘eclipse’.

Ocorrem no mínimo 2 eclipses por ano, que são solares, e, no máximo, 7 eclipses por ano, 2 lunares e 5 solares, ou 3 lunares e 4 solares. A cada 18 anos aproximadamente, todos os eclipses acontecem com a mesma regularidade. Esse intervalo de tempo é denominado de Período de Saros, quando ocorrem 41 eclipses do Sol e 29 eclipses da Lua (inicialmente desvendado pelos povos da Mesopotâmia, 3.000 a.C.).

Embora os eclipses lunares sejam menos frequentes em número, a visualização desse tipo de eclipse a partir de qualquer ponto da Terra é facilitada em função de que basta ter a Lua acima do Horizonte para podermos observá-lo (além de um céu sem nuvens obviamente).

1.8 Marés dos oceanos

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

1.8.1 Interações gravitacionais Sol–Terra–Lua

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

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

A força gravitacional do Sol ao ponto mais próximo da Terra é maior do que a força no lado diametralmente oposto da superfície; a diferença na distância desses dois pontos é igual, no máximo, ao diâmetro equatorial do planeta. Ocorre, então, o fenômeno denominado de efeito de maré. Isso também pode ser dito para a interação entre a Lua e a Terra.

Tanto a crosta terrestre como a lunar sofrem o efeito de maré respectivamente devido à ação da Lua e da Terra. A atmosfera da Terra também sofre o efeito de maré, o qual não é tratado nesta seção. Também não é discutido o efeito de maré sobre a crosta da Terra mas, sim, sobre sua massa líquida superficial que se comunica entre si.

Em função do efeito de maré sobre os oceanos, cujo predomínio é da Lua, o nível do mar eleva-se basicamente na direção do vetor resultante da composição do efeito de maré Lua-Terra (peso 2) e do efeito de maré Sol-Terra (peso 1). Na Figura 21, visualiza-se a ocorrência das marés altas na direção Sol-Terra-Lua, em pontos diametralmente opostos quando da ocasião da Lua cheia. As marés baixas ocorrem em pontos da superfície oceânica situados na direção perpendicular àquela direção. Na fase nova da Lua, a situação repete-se.

1.8.2 Periodicidade das cheias e vazantes

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

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

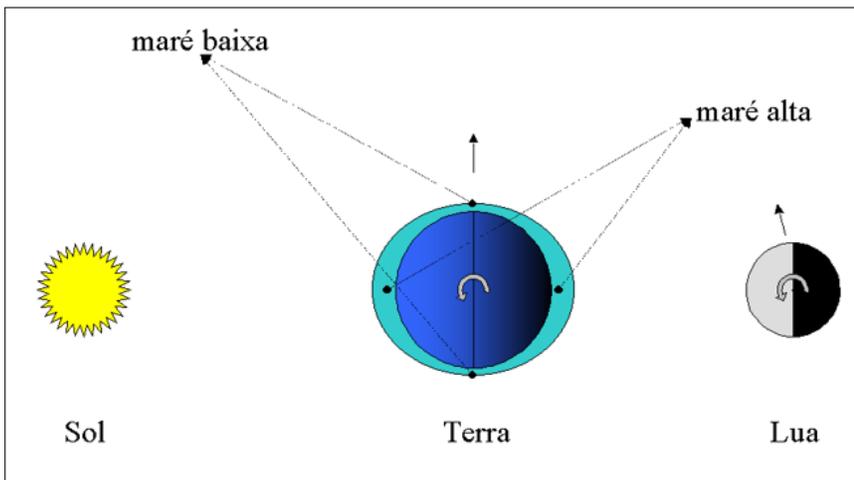


Figura 21 – Ilustração do efeito de maré total sobre os oceanos da Terra na ocasião da Lua cheia (visão do norte da eclíptica, fora de escala). (Fonte: Elaboração do autor.)

A intensidade das marés dos oceanos é dependente em primeira instância da fase lunar. Outros fatores são a configuração litorânea (por exemplo, presença de praias, falésias, baías ou lagoas) e a variação da profundidade do mar na plataforma continental. Quanto menos profunda a plataforma continental, maior é o desnível entre as marés alta e baixa.

Nas fases nova e cheia da Lua, o efeito de maré da Lua é somado diretamente ao do Sol. Nessas ocasiões, as cheias e vazantes dos oceanos são as mais acentuadas de todo ciclo lunar (Figura 21), que são intensificadas ainda mais se a Lua (na fase nova ou cheia) estiver no apogeu e/ou Terra estiver no periélio. As cheias ocorrem ao meio-dia e à meia-noite aproximadamente. As vazantes acontecem nos instantes intermediários ($\approx 6\text{h}$ e 18h).

Quando a Lua está em quarto crescente, as cheias são observadas por volta das 4h (madrugada) e 16h e as vazantes, por volta das 10h e 22h. No quarto minguante, as marés altas ocorrem em torno das 8h e 20h e as baixas, por volta das 2h e 14h. Modifique a Figura 21 para um entendimento melhor.

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

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

disso, a Lua acaba se afastando da Terra numa taxa de cerca de 3 cm por ano, porque a perda de momento angular da rotação da Terra é transferida para o momento angular orbital da Lua a fim de conservar o momento angular total do sistema Terra-Lua.

O QUE É FORÇA GRAVITACIONAL?

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

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

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

Referências

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

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

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

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

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

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

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

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

Agradecimentos

Revisão gramatical e de conteúdo por Fernando Santoro e Ana Zodi, respectivamente.



2. Astrofísica Observacional

Francisco Jablonski

2.1 Introdução

Esta introdução serve como um alerta ao leitor: não espere encontrar detalhes meticulosos ou aspectos extremamente elaborados dos instrumentos e técnicas usados nas observações astronômicas atuais. Em vez disso, vamos nos ater aos conceitos fundamentais, como a medição da energia, tempo, posição e massa dos objetos no Universo. A abordagem é similar à da Física experimental, mas com algumas ênfases diferenciadas. Vale ressaltar que nossa capacidade de acessar diretamente os corpos celestes, como se fossem amostras de laboratório, é ainda bastante restrita e, em certos aspectos, pode ser inacessível permanentemente.

Com isso em mente, organizamos a forma como recebemos informações desse vasto e distante laboratório em algumas categorias: (i) a radiação eletromagnética e energia associada emitida pelos objetos – que é, de longe, nossa principal fonte de informação; (ii) informações que vêm de fora do espectro eletromagnético;

(iii) as mudanças ao longo do tempo dessas informações; e (iv) a localização dessas fontes no espaço.

2.2 O Espectro Eletromagnético

2.2.1 O que quer dizer “espectro eletromagnético”

Hamlet é o nome de uma peça muito famosa escrita por William Shakespeare por volta do ano 1600. Uma das primeiras cenas é impressionante: os guardas de um castelo na Dinamarca vêm o espectro do falecido rei Hamlet vagando pelas ameias durante a noite. A explicação para o aparecimento do fantasma fornece o enredo da peça, que contém sete mortes a golpes de espada, envenenamentos e afogamentos, loucuras verdadeiras e simuladas, adultério, a caveira de um alegre bobo da corte desenterrada no momento oportuno e, claro, um *espectro* fantasmagórico. No cinema, uma das montagens mais famosas tem Mel Gibson no papel do Hamlet filho. A cena com o fantasma mostra o espectro do velho rei sob forma fosforescente e transparente.



Figura 1 – O “espectro” do rei Hamlet.
(Fonte: [https://ychef.files.bbci.co.uk/.](https://ychef.files.bbci.co.uk/))

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

2.2.2 Espectro sonoro (ou acústico)

Quem resiste apertar pelo menos uma tecla estando perto de um piano desatendido? Se apertarmos a vigésima nona tecla da esquerda para a direita (tecla lá, 4^a oitava), o som produzido é uma vibração de 440 ciclos por segundo¹. Tecnicamente, dizemos que a frequência da onda sonora correspondente ao lá₄ é 440 Hertz ou 440 Hz. As outras teclas nesta mesma oitava dão sons de dó₄ 262 Hz, ré₄ 294 Hz, mi₄ 330 Hz, fá₄ 349 Hz, sol₄ 392 Hz, si₄ 494 Hz. Para obter as frequências das notas nas outras oitavas do piano, é só lembrar que de uma oitava para a oitava seguinte a frequência dobra. Assim, o dó₅ tem 524 Hz de frequência.

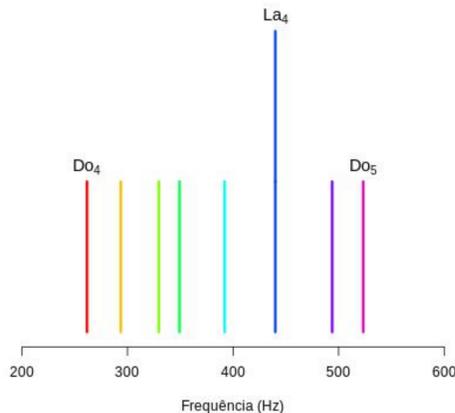


Figura 2 – O espectro acústico de um piano na 4^a oitava.
(Fonte: autor.)

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

A figura 2 mostra o espectro acústico do piano em torno da 4ª oitava. O eixo horizontal representa as frequências, o eixo vertical, a intensidade do som. Note que se você golpear mais forte uma das teclas, o piano soará mais alto. Isso está representado na figura pelo comprimento vertical mais longo para a nota lá₄.

A figura 3 mostra o que aconteceria se tivéssemos um aparelho capaz de registrar a vibração das cordas do piano em um milésimo de segundo. Note que nesse intervalo de tempo a nota lá executa $440/100 = 4,4$ oscilações.

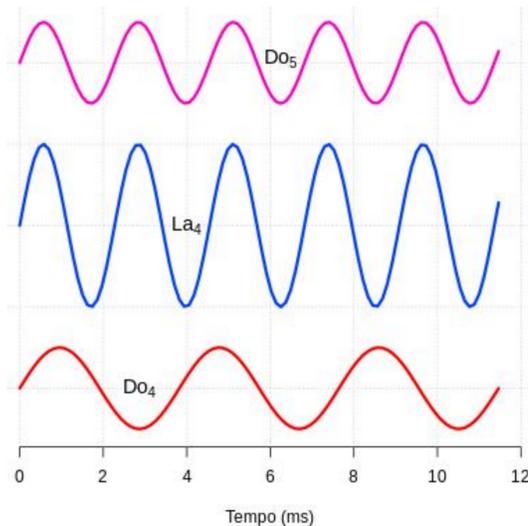


Figura 3 – As ondas acústicas correspondentes ao espectro sonoro da figura 2. (Fonte: autor.)

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

A figura 4 mostra um outro exemplo de espectro acústico: tanto o nosso Sol quanto a vizinha Alfa do Centauro oscilam num conjunto de frequências correspondentes a períodos entre 4 a 6 minutos,

como se fossem enormes sinos “esféricos” vibrando continuamente. O estudo das frequências de vibração das estrelas chama-se *Astrosismologia* e permite conhecer detalhes muito finos da estrutura interna delas. Uma pergunta que é frequentemente feita neste contexto é: “mas, se são ondas acústicas, como podemos detectá-las, já que o meio entre o Sol e a Terra é essencialmente vácuo?”. A resposta é que as ondas acústicas ocorrem no gás da atmosfera solar, e os efeitos dos movimentos associados a elas se mostram como variações de intensidade da luz que podem ser detectadas por sensores terrestres.

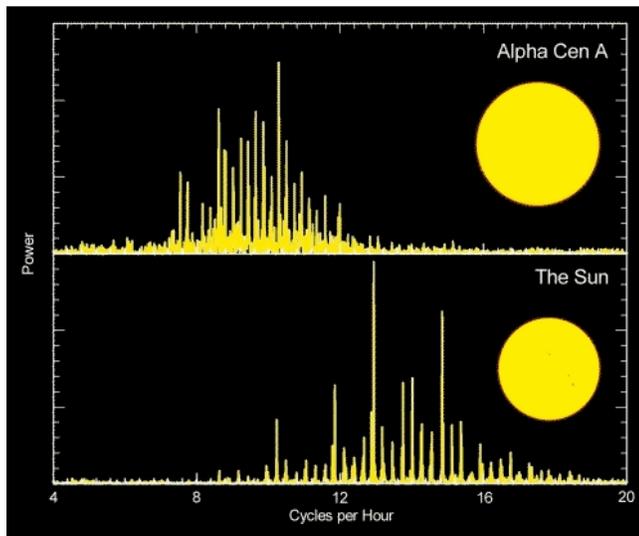


Figura 4 – O espectro de ondas acústicas no Sol e em Alfa do Centauro. (Fonte: <https://www2.hao.ucar.edu/hao-science/sun-dynamo-0>)

2.2.3 O espectro eletromagnético (EM)

Agora fica mais fácil visualizar o que é espectro eletromagnético (EM). É um conceito semelhante ao mostrado nas figuras 2 e 3, com a diferença que as vibrações não são mecânicas, como as das cordas do piano, mas vibrações *elétricas e magnéticas*. Quando dizemos que uma rádio transmite em AM na frequência de 780 quilo-hertz,

estamos dizendo que na antena transmissora dessa rádio, cargas elétricas realizam pequenos deslocamentos de um lado para outro com frequência de 780 mil ciclos por segundo! Essa vibração produz ondas eletromagnéticas que deixam a antena e se propagam pelo espaço. Um receptor de rádio é capaz de captar essas ondas de modo grosseiramente análogo ao nosso ouvido, que é capaz de captar o som do piano mesmo que estejamos longe dele.

Do mesmo modo que para as ondas sonoras, a frequência das ondas eletromagnéticas também pode variar. E muito. Por volta de 1 milhão de Hertz temos as rádios AM. Entre 88 milhões de Hertz (de forma mais compacta, 88 mega-hertz ou 88 MHz) e 108 MHz temos a frequências onde operam as emissoras de FM.

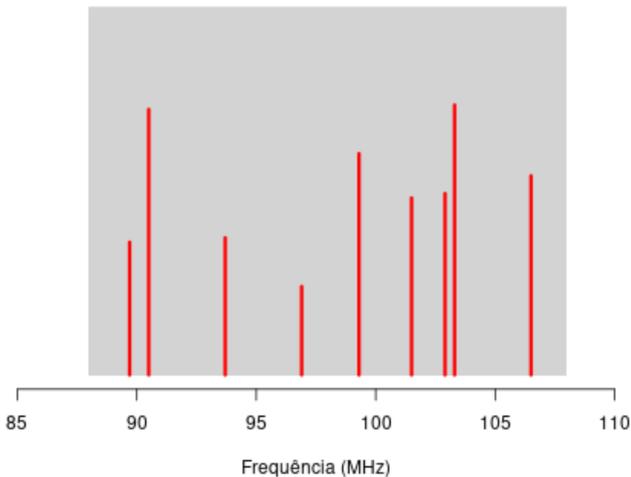


Figura 5 – O espectro da emissão das rádios na região de FM.
(Fonte: autor)

A figura 5 ilustra o espectro das rádios FM. Note que algumas são mais fortes que outras. Telefones celulares operam em frequências de quase 1 bilhão de Hertz (1 giga-hertz ou 1 GHz).

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

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

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

Numa forma mais compacta, utilizando símbolos matemáticos podemos escrever:

$$\lambda = c/\nu \quad (2.2)$$

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

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

$$\text{comprimento de onda} = 300.000.000/6.100.000 \simeq 49 \text{ m} \quad (2.3)$$

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

2. Energia das ondas eletromagnéticas.

Uma das grandes descobertas da física é que em diversas circunstâncias de sua interação com os materiais, podemos entender as ondas eletromagnéticas como “pedacinhos” (pacotes de onda), cada um carregando uma certa quantidade de energia:

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

ou, em forma matemática:

$$E = h\nu \quad (2.5)$$

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

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

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

$$\frac{660.000}{6,6 \times 10^{-34} \times 10^6} = 10^{33} \text{ pacotes!!} \quad (2.6)$$

A figura 6 identifica outras formas com que a radiação eletromagnética aparece na Natureza. Note que nessa figura foi usada uma forma compacta de expressar os números enormes que aparecem quando falamos da frequência das ondas eletromagnéticas. A lógica é simples, veja: $1000 \text{ Hz} = 10^3 \text{ Hz}$, $10000 \text{ Hz} (10 \text{ kHz}) = 10^4 \text{ Hz}$, $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$. A luz que nos ilumina tem frequência entre 10^{14} e 10^{15} Hz .

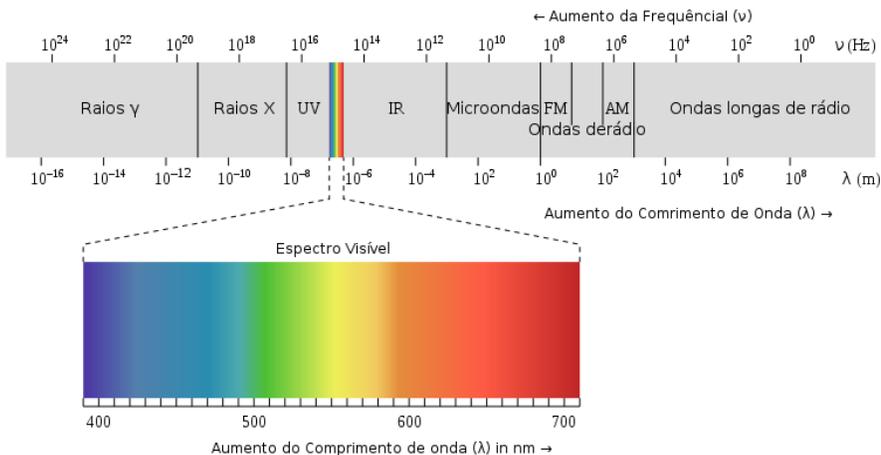


Figura 6 – O espectro eletromagnético. Note as unidades, $1 \text{ nm} = 0,000000001 \text{ metros}$, ou 10^{-9} m . (Fonte: <https://commons.wikimedia.org>)

O espectro emitido por uma fonte de radiação eletromagnética não precisa ser confinado à frequências bem definidas, como mostrado nas figuras 2 e 5. A maioria dos objetos no céu emite em faixas

amplas de frequência. Tecnicamente isso se chama espectro “contínuo”. A analogia com o piano seria a seguinte: essas fontes se comportam como se fossem um piano eletromagnético de um número enorme de teclas, todas elas sendo tocadas ao mesmo tempo.

A figura 8 mostra uma boa aproximação ao que é o espectro eletromagnético das estrelas: quanto maior é a temperatura mais energia é emitida por unidade de área e mais deslocado para o azul é o máximo do espectro. Isso é expresso pela lei de Wien,

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \mu m, \quad (2.7)$$

onde T sempre é dada em graus Kelvin, ou seja, graus Celsius + 273.

A característica da lei de Wien de que o espectro tem um máximo que se desloca para comprimentos de onda mais longos à medida que a temperatura diminui é muito importante no contexto dos *exoplanetas*. Hoje, há cerca de 5650 exoplanetas conhecidos (Março de 2024). São planetas em torno de outras estrelas. No entanto, apenas 19 foram imageados diretamente até hoje. A razão para isso é que as quantidades de energia luminosa emitidas pela estrela e pelo planeta são muito diferentes, o planeta sendo milhões de vezes mais fraco. Uma característica que ajuda, por outro lado, é a temperatura. Os planetas têm temperaturas muito mais baixas (a Terra, por exemplo, cerca de 300 K). Significa que observando no infravermelho, o contraste aumenta muito em favor do planeta, e em alguns casos é possível vê-los diretamente. A figura 7 mostra uma imagem do primeiro exoplaneta detectado numa imagem direta. A representação como mais vermelho que a estrela indica que sua temperatura é mais baixa. Em primeira aproximação, podemos ter uma ideia do espectro de um planeta ou de uma estrela sabendo somente sua temperatura e conhecendo a *Lei de Planck*. Em termos matemáticos, essa lei é escrita como

$$B_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)}. \quad (2.8)$$

Nela, h é a constante de Planck, c a velocidade da luz, k a constante de Boltzmann e T a temperatura em K. Esquecendo um pouco as unidades físicas, vemos que para uma dada temperatura, a dependência da quantidade de energia emitida com o comprimento de onda é muito acentuada, indo com o inverso da *quinta* potência de λ . Uma outra consequência dessa lei é que a *quantidade total* de energia radiante emitida é

$$M = \sigma T^4, \quad (2.9)$$

sendo conhecida por *lei de Stefan-Boltzmann*. A implicação dela é que para um mesmo tamanho, uma estrela que é $2 \times$ mais quente que outra emitirá $16 \times$ vezes mais energia radiante no total.

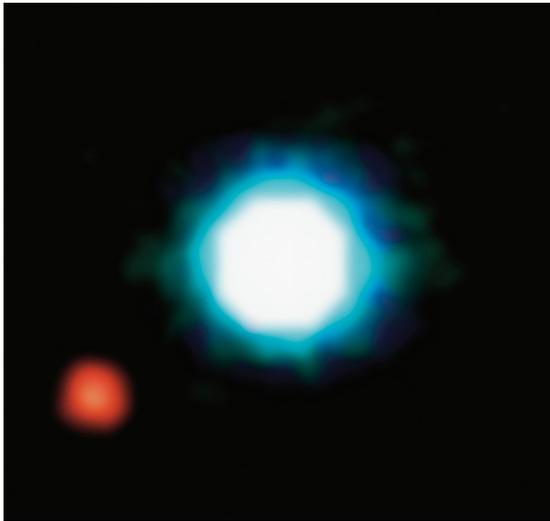


Figura 7 – O primeiro exoplaneta imageado diretamente, na estrela 2M1207-39, com o exoplaneta 2M1207b (mais vermelho, portanto mais frio) próximo. (Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/2M1207>).

Os espectros reais das estrelas diferem dos espectros mostrados na figura 8 pela presença de absorções e emissões causadas por distintos elementos químicos que compõem as estrelas.

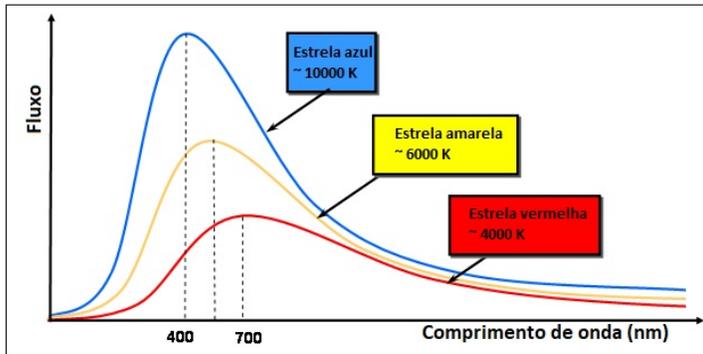


Figura 8 – O espectro eletromagnético aproximado de estrelas a diferentes temperaturas. (Fonte: <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/B/Blackbody+Radiation>.)

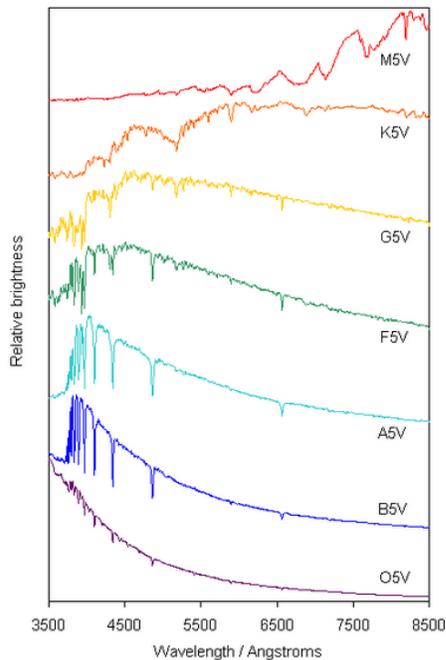


Figura 9 – O espectro real de alguns tipos de estrelas. A temperatura diminui de baixo para cima, mais ou menos seguindo a cor dominante das estrelas. Compare com a figura 8. (Fonte: <http://www.jb.man.ac.uk/distance/life/sample/stars/index.html>).

A figura 9 ilustra o fato de que o espectro das estrelas não é exatamente como a idealização da figura 8. A sequência mostra, de baixo para cima estrelas muito quentes (a temperatura pode chegar a dezenas de milhares de graus), enquanto as mais frias têm apenas alguns mil graus. Para referência, o nosso Sol, uma estrela G2, possui temperatura na superfície de aproximadamente 5700 graus Kelvin. É interessante notar que a forma geral desses espectros é semelhante aos da figura 8, mas com algumas diferenças importantes. Uma delas é que os espectros estelares possuem *linhas espectrais*. Por exemplo, as linhas em 6563 Å (656,3 nm) e 4861 Å (486,1 nm) são provenientes do hidrogênio na atmosfera dessas estrelas. A presença das linhas espectrais é muito importante, pois permite que saibamos de que material uma estrela é feita e também saber as condições em que este material se encontra. As estrelas mais frias na figura 9, especialmente as de tipo K e M, possuem uma outra propriedade interessante: elas apresentam compostos na forma de moléculas em suas atmosferas. Isso faz com que os espectros difiram muito mais dos correspondentes espectros de corpo negro à mesma temperatura.

2.2.4 Fotometria ou espectroscopia?

Examinando a equação 2.8, podemos nos perguntar: quão finamente podemos especificar $d\lambda$? Em princípio, parece que arbitrariamente. Mas é fácil ver que na prática, nas observações astronômicas, a fineza de $d\lambda$ tem limites. Quanto mais finamente analisamos o espectro *menos* fótons coletamos por intervalo de comprimento de onda. A solução para esse problema nas observações astronômicas é aumentar $d\lambda$ de modo a cobrirmos *bandas* do espectro eletromagnético. Embora com menor precisão, essa abordagem ainda permite estimar a temperatura associada à emissão de corpo negro, sendo um método tradicional de medir altas temperaturas mesmo na indústria. O método de medir as propriedades dos espectros dentro

de bandas tem o nome tradicional de *fotometria em bandas*.² A quantidade $R = \lambda/d\lambda$, chamada de *resolução espectral*, é uma medida de quão finamente pode-se observar o espectro eletromagnético.

Um aspecto de grande importância relacionado com a resolução espectral é a presença de raias bem definidas no espectro das estrelas. A informação da posição dessas raias observada no espectro fornece informações importantes sobre o *estado de movimento* delas (e de seu ambiente) com relação ao observador. Da mesma forma como as ondas acústicas têm a frequência modificada quando se afastam ou se aproximam do observador, as ondas eletromagnéticas sofrem o mesmo efeito, ou seja, estão sujeitas ao *efeito Doppler*. Esse efeito tem uma expressão bem simples,

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}. \quad (2.10)$$

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

Outra aplicação importante da equação 2.10 é na determinação das massas das estrelas em sistemas binários. A figura 10 ilustra uma binária em três momentos: à esquerda, quando a componente vermelha se *afasta* de nós com maior velocidade. À direita, quando ela se *aproxima* de nós com maior velocidade. Note que o movimento oposto ocorre com a componente azul. No painel do centro, embora as componentes estejam se movendo, não há movimento na nossa direção. A abreviação CM refere-se à posição do centro de massa do sistema. Agora veja o que ocorre com as linhas espectrais (de um mesmo elemento) para ambas as componentes. No

²Rigorosamente, dever-se-ia utilizar o termo *radiometria em bandas*, para não conflitar com padrões consagrados na engenharia no que diz respeito ao termo fotometria, que é usado particularmente no contexto da resposta visual do olho humano à radiação incidente.

painel da esquerda, com a estrela vermelha se afastando de nós, a linha se desloca para comprimentos de onda maiores (veja Eq. 2.10). No painel da direita, o oposto: a linha se desloca para o azul. Para a outra estrela, ocorre o oposto. A Eq. 2.10 nos permite obter as velocidades máximas de afastamento e aproximação. O valor médio da amplitude delas (ignorando o sinal) vai ser v_{verm} e v_{azul} . A relação entre as massas das componentes (m_{verm} , m_{azul}) e as velocidades é bem simples,

$$\frac{v_{verm}}{v_{azul}} = \frac{m_{azul}}{m_{verm}}. \quad (2.11)$$

Claro que a inclinação orbital é importante e não está levada em conta na equação acima, mas para certos sistemas, como binárias eclipsantes, ela pode ser obtida com grande precisão. Com essa informação e o valor do período orbital, pode-se obter os valores das massas individuais. Em alguns casos, a precisão na determinação das massas é melhor que 1%!

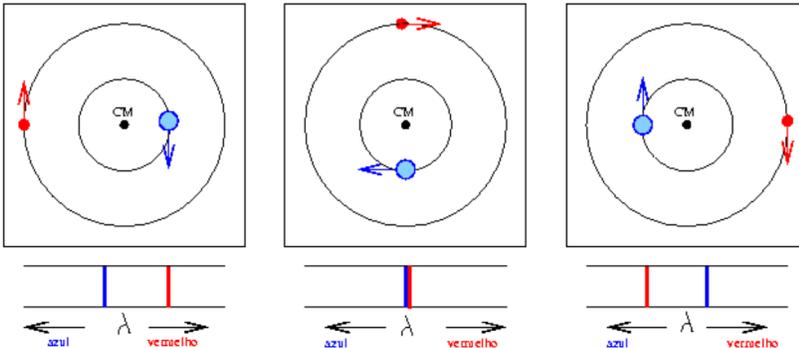


Figura 10 – Um sistema binário com a representação do deslocamento Doppler da linha espectral de um mesmo elemento à medida que as estrelas se movem em órbita. (Fonte: <http://astro.if.ufg.br/bin/binarias.htm>.)

Examinando a equação 2.9 e mesmo a figura 8, podemos perceber que a emissão de corpo negro depende fortemente da temperatura. Isso se reflete também no brilho das estrelas, tanto intrínseco quanto aparente. O nosso olho, porém, responde logarithmicamente ao estímulo luminoso. Isso acarretou que desde os tempos históri-

cos utilizou-se uma escala logarítmica também para expressar o brilho das estrelas. É a *escala de magnitudes*. Matematicamente, a magnitude de um corpo negro como o da equação 2.8 é expressa como

$$m_\lambda = -2,5 \log_{10}(B_\lambda) + C. \quad (2.12)$$

A constante C é escolhida de tal modo que algum objeto de referência possa ser usado. No sistema de magnitudes Vega, C é tal que $m_\lambda = 0$ em qualquer comprimento de onda.

2.2.5 Polarização da radiação eletromagnética

Como dissemos anteriormente, a radiação eletromagnética consiste de campo elétrico e magnético oscilantes perpendicularmente e se propagando transversalmente. Para simplificar, vamos pensar somente no campo elétrico. A emissão de radiação de corpo negro é o resultado de muitos processos aleatórios que acontecem no material em questão. Esses processos incluem um número enorme de interações entre elétrons oscilando, e como os movimentos são completamente aleatórios, a radiação emitida tem seus planos de oscilação aleatoriamente distribuídos. Chamamos isso de radiação *não-polarizada*.

A interação da radiação não-polarizada com os materiais na Natureza (especialmente os não-metálicos) modifica essa situação. Quando incide sobre uma superfície não-metálica, a radiação não-polarizada tem a componente de oscilação paralela à superfície parcialmente suprimida, de forma que o que é refletido tem um plano (médio) preferencial de oscilação. A radiação emergente nesse caso chama-se *radiação linearmente polarizada*.

Esse processo tem importância no meio interestelar das galáxias. Como existe uma certa quantidade de poeira (compostos de Silício, Carbono, etc) a reflexão da luz nesse material leva à polarização da radiação emitida por objetos distantes, que atravessa esse meio e chega até nós. O efeito permite mapear características do material no meio interestelar, e é um dos temas de pesquisa na Di-

visão de Astrofísica do INPE. Um instrumento especialmente construído para medir tais efeitos (a câmara SPARC4³) foi construído recentemente e é utilizado para medir o estado de polarização da luz proveniente de objetos no céu.

2.2.6 O presente acesso ao espectro eletromagnético

Para dar uma ideia sobre o alcance que a tecnologia atual permite em acessar o espectro eletromagnético, vamos listar em ordem decrescente de energia (ou frequência) os observatórios e instrumentos disponíveis em 2023.

Aqui é útil lembrar uma unidade de energia, o elétron-Volt (eV). É quanta energia cinética um elétron ganha ao ser acelerado sob o potencial de 1 Volt. Na faixa do espectro eletromagnético que enxergamos, temos fótons entre 1-3 eV.

- **Cherenkov Telescope Array (CTA)**⁴: É um instrumento a ser instalado nos andes Chilenos, com uma contrapartida no hemisfério Norte, capaz de detectar fótons (raios gama) de energia entre 20 GeV (ou seja, 20 bilhões de eV) a 300 TeV (300×10^{12} eV) e determinar a posição no céu de onde vieram. Entre os objetivos científicos do projeto estão a observação de regimes de energia não alcançáveis em Terra, como os que ocorrem em torno de buracos negros. As próprias leis fundamentais da Física nunca foram testadas nesse regime. O CTA utiliza tecnologia e experiência de projetos de menor escala como o MAGIC, HESS e VERITAS.
- **Fermi Observatory**⁵: É um satélite que operou durante cerca de 15 anos medindo a direção e energia de fótons com energia

³<https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/primeira-luz-da-sparc4>

⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_Telescope_Array.

⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Fermi_Gamma-ray_Space_Telescope.

entre 20 MeV e 300 GeV. Com capacidade de observar o céu inteiro, foi capaz de fazer um mapa da distribuição de raios gama galácticos e extragalácticos, além de detectar diversos surtos de raios gama produzidos pela coalescência de objetos como estrelas de nêutrons e explosões de supernovas.

- **Uhuru:** Este satélite foi lançado em 1970 com a missão de fazer um levantamento das fontes de raios X no céu na faixa de energias de 2-20 keV. O satélite foi o responsável pela descoberta de várias *binárias de raios X*, entre elas o primeiro sistema contendo burado negro, Cyg-X1. Este satélite foi seguido de uma extensa lista de outros observatórios⁶ mais ou menos na mesma faixa de energias.
- **International Ultraviolet Explorer (IUE)**⁷: Foi um dos satélites pioneiros a observar na faixa do ultravioleta em energias de 3,7 a 11 eV. O instrumento foi fundamental para determinar as propriedades da absorção da radiação estelar pelo material existente entre as estrelas.
- **Telescópios Ópticos:** Aqui temos uma gama de instrumentos ao longo da história, desde a luneta de Galileu Galilei até o telescópio espacial Hubble e os telescópios de 10-m de diâmetro, como o Keck instalado no Hawaii. A faixa de energias coberta é da ordem de 1 eV. A Astronomia brasileira tem acesso à uma fração de tempo observacional nos telescópios Gemini⁸ (Norte e Sul) e uma grande participação no telescópio SOAR⁹. A contribuição da FAPESP ao Giant Magellan Telescope¹⁰ (GMT) permitirá acesso a esse telescópio de 25-m de diâmetro.

⁶https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_X-ray_space_telescopes.

⁷https://en.wikipedia.org/wiki/International_Ultraviolet_Explorer.

⁸https://en.wikipedia.org/wiki/Gemini_Observatory.

⁹https://en.wikipedia.org/wiki/Southern_Astrophysical_Research_Telescope.

¹⁰https://en.wikipedia.org/wiki/Giant_Magellan_Telescope.

- **Infrared Astronomical Satellite (IRAS)**¹¹: Este instrumento foi precursor das missões espaciais no infravermelho. Aqui torna-se mais conveniente expressar a energia dos fótons em termos do comprimento de onda associado, sendo a faixa coberta algo entre 12-100 μm . O sucessor mais famoso a esse telescópio é o *James Webb Space Telescope*, com 6,5-m de diâmetro, cobrindo a faixa do espectro eletromagnético de 0,6 – 28,5 μm . O IRAS foi responsável pelo mapeamento completo do céu no infravermelho, com a descoberta de importantes fontes pontuais, como aquelas relacionadas a objetos nos primeiros estágios de evolução, além de galáxias com altos conteúdos de poeira.
- **Herschel**¹²: Este telescópio espacial já pode ser considerado como trabalhando no regime de comprimentos de onda sub-milimétricos, pois tinha instrumentos sensíveis de 55 – 670 μm . Os objetivos científicos de forma ampla foram de estudar o meio interestelar frio e a química do mesmo.
- **Atacama Large millimeter/submillimeter Array (ALMA)**¹³: Com uma cobertura na faixa de 320 μm a 3,7 mm, aqui já temos o regime tipicamente visto em radiotelescópios. O arranjo interferométrico contém 66 antenas. O ALMA produz imagens em rádio com resolução 5 vezes melhor que do telescópio Hubble. O ALMA produziu um benefício colateral para a Astronomia brasileira. O projeto de suas antenas é utilizado no interferômetro LLAMA que tem financiamento parcial da Fapesp para produzir interferometria de longa base envolvendo telescópios semelhantes na Argentina e no próprio ALMA. O objetivo é produzir imagens com resolução sem precedentes nessa faixa do espectro.

¹¹<https://en.wikipedia.org/wiki/IRAS>.

¹²https://en.wikipedia.org/wiki/Herschel_Space_Observatory.

¹³https://en.wikipedia.org/wiki/Atacama_Large_Millimeter_Array.

- **Low Frequency Array (LOFAR)**¹⁴: Aqui temos um arranjo interferométrico em rádio, operando com 20 mil pequenas antenas espalhadas na Europa. A maior parte delas fica na Holanda. A faixa de frequências coberta corresponde a comprimentos de onda de 1,3 a 30 m. Um dos interesses científicos para os quais o LOFAR é talhado é a observação de sinais originários de quando o Universo tinha apenas 1/10 do seu volume atual, e que por conta da expansão apresentam-se hoje em frequências de dezenas a centenas de MHz. Outro ponto de interesse é a emissão de radiação por planetas com campos magnéticos semelhantes ao de Júpiter, onde a precipitação de partículas provenientes do Sol produz radiação com comprimentos de onda da ordem de dezenas de MHz.
- **Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions (DEMETER)**¹⁵: Foi um microsatélite lançado em 2004 que e funcionou até 2010. Apesar de que a missão prioritária era investigar perturbações na ionosfera terrestre durante eventos de atividade sísmica ou vulcânica na Terra, o instrumento demonstra a existência e a capacidade de detectar-se radiação eletromagnética de muito baixa frequência (alguns Hz até aproximadamente 20 kHz). Apesar desse tipo de observação não fornecer diretamente evidências da emissão de radiação eletromagnética de frequências muito baixas provenientes de outros objetos celestes, os efeitos associados à interação de ejeções de partículas e radiação do Sol ou de surtos de raios gama com o ambiente terrestre mostram claramente sua existência. A radiação eletromagnética de frequência ultra baixa, na faixa de 300 Hz a 3 kHz, apensar de também não ser observada de fontes celestes, tem interesse em Terra, particularmente no campo de mineração, uma vez que nessas frequências o terreno e as rochas produzem pequena absorção.

¹⁴ [https://en.wikipedia.org/wiki/Low-Frequency_Array_\(LOFAR\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Low-Frequency_Array_(LOFAR)).

¹⁵ [https://en.wikipedia.org/wiki/Demeter_\(satellite\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Demeter_(satellite)).

2.2.7 Espectro de ondas gravitacionais

Existe um outro tipo de processo oscilatório na Natureza que é diferente das ondas sonoras e das ondas eletromagnéticas: são as *ondas gravitacionais*. Elas também se propagam com a velocidade da luz, mas em vez de serem produzidas por cargas elétricas aceleradas, são produzidas por *massas* em movimento acelerado. Uma fonte importante de ondas gravitacionais são os sistemas binários envolvendo estrelas, estrelas compactas e buracos negros. Pode-se dizer que a nossa galáxia é um imenso piano com alguns bilhões de teclas, cada uma delas constantemente apertadas produzindo ondas gravitacionais cuja frequência é proporcional ao dobro da frequência com que o sistema binário gira. A potência emitida em forma de ondas gravitacionais varia rapidamente com a frequência orbital (sexta potência), e a superposição de muitas fontes contribui para parte do *fundo estocástico* de ondas gravitacionais recentemente descoberto.

Em 14 de setembro de 2015, as ondas gravitacionais foram observadas diretamente pela primeira vez. Foram geradas por uma colisão entre dois buracos negros. Essas ondas levaram 1,3 bilhões de anos para chegar até a Terra.

A detecção de ondas gravitacionais (figura 11) é uma das maiores conquistas da Humanidade, uma vez que as oscilações causadas por esse fenômeno têm amplitude extremamente pequena. Enquanto as ondas sonoras podem facilmente ser medidas em escalas de milímetros ou mais, uma onda gravitacional apresenta amplitude muito menor que as dimensões de um *núcleo atômico*.

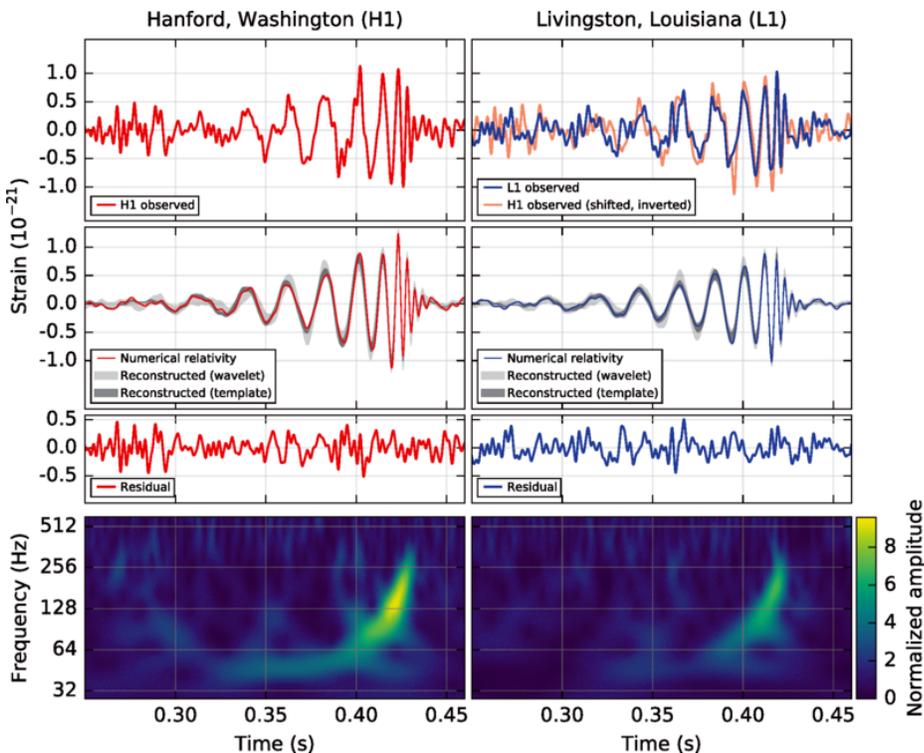


Figura 11 – A primeira detecção de ondas gravitacionais. Os gráficos em vermelho e azul referem-se aos dois observatórios separados de 4000 quilômetros. Os painéis de baixo mostram como a frequência das oscilações foi aumentando com o tempo, à medida que as duas massas envolvidas foram espiralando uma na direção da outra. (Fonte: Wikipedia).

Atualmente, pode-se dizer alguma coisa sobre como é o *espectro de ondas gravitacionais*. Acredita-se que as oscilações ocorridas no Big Bang, ou seja na formação do Universo, estejam até hoje permeando o Universo. Além disso, fenômenos transientes como o da figura 11 deixam sua assinatura por curtos intervalos de tempo, enquanto a superposição da emissão das fontes binárias na Galáxia deve produzir um espectro contínuo que nas próximas décadas será objeto de intensos estudos. A figura 12, produzida pelo autor em uma das primeiras edições do CIAA, mostra esquematicamente a forma do espectro de ondas gravitacionais

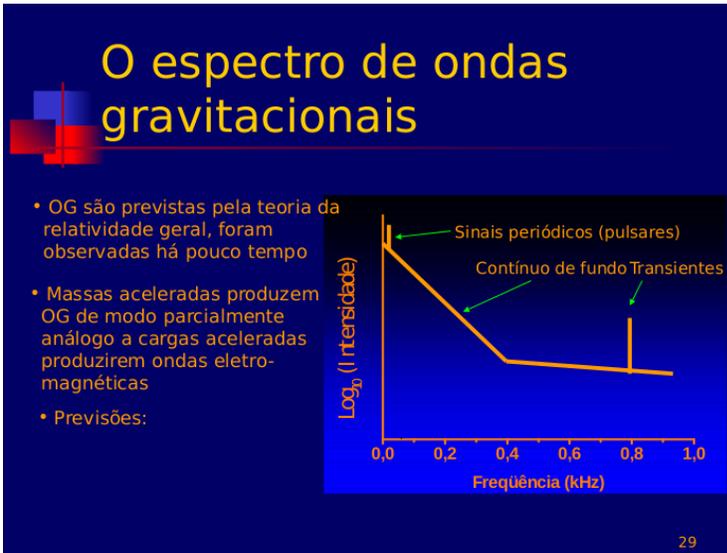


Figura 12 – O espectro de ondas gravitacionais. Os sinais transientes foram detectados a partir de 2015. O fundo estocástico que aumenta de amplitude para frequências mais baixas foi descoberto em 2023. Espera-se detectar nos próximos anos a contribuição de fontes relativamente “monocromáticas”, como pulsares, nos próximos anos. (Fonte: autor).

2.2.8 Outros portadores de informação astrofísica

A radiação eletromagnética é o portador de informação astrofísica mais diversificado em função da variedade de processos físicos ao longo de várias décadas de frequência. No entanto, *partículas* também carregam informações importantes. O caso mais comum são as partículas ejetadas pelo Sol no vento solar. Elas interagem com o campo magnético e a ionosfera da Terra produzindo uma variedade de efeitos. O INPE/MCTI tem um programa especial de monitoria dos efeitos da interação de radiação e partículas com o ambiente terrestre.¹⁶ Um observatório de partículas de ultra altas ener-

¹⁶<https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>.

gias (10^{18} eV) é o Projeto Pierre Auger.¹⁷ que utiliza uma combinação de detectores parecidos com os CTA que medem interações dos raios cósmicos com a atmosfera terrestre, mas também detectores que medem a interação das cascatas de eventos produzidas nas interações primárias com tanques de água contendo sensores que detectam cintilação. O Brasil participa da colaboração internacional com uma participação significativa da Fapesp e do governo federal.

2.2.9 Variações no tempo

Parafraseando Camões, “Tudo é feito de mudanças”. As escalas de tempo com que os fenômenos na Natureza variam é comparável em amplitude às variações nas dimensões de suas partes. Em Astrofísica, sem contar as mudanças de natureza atômica e nuclear, observamos fenômenos tão rápidos quanto os pulsares de milissegundo à evolução das estrelas, em escala de tempo de bilhões de anos (ainda que indiretamente neste último caso). A variabilidade não se limita ao espectro eletromagnético – ela foi essencial para a primeira detecção direta de ondas gravitacionais, como na figura 11, e apresenta-se também no fluxo de partículas como as provenientes do Sol.

Pode-se dividir a variabilidade da radiação recebida dos objetos celestes basicamente em duas categorias: (i) as intrínsecas como nos movimentos dos gases na atmosfera do Sol ou na explosão de Novas e Supernovas, e as puramente geométricas, como nos eclipses em estrelas binárias, trânsitos planetários e ocultações por asteroides. As figuras 13 e 14 ilustram o comportamento de fenômenos variáveis intrínsecos, um com escala de tempo de variabilidade de dias a meses, outro com escala muito mais rápida. No primeiro caso, uma erupção de Nova, que ocorre por conta de detonações term nucleares na superfície de uma estrela compacta. O segundo exemplo foi descoberto há menos de 20 anos, e não se tem certeza ainda sobre a origem do fenômeno.

¹⁷https://en.wikipedia.org/wiki/Pierre_Auger_Observatory.

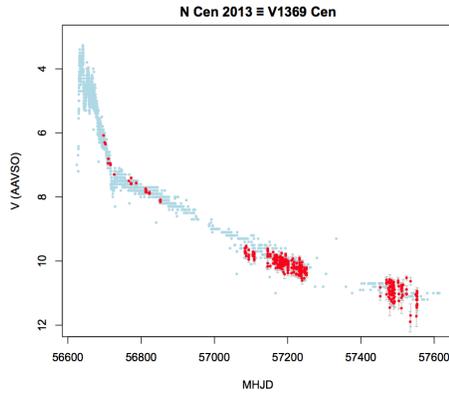


Figura 13 – A erupção da Nova Centauri 2013, registrada com medidas fotométricas em todo o hemisfério Sul, incluindo São José dos Campos. A Nova foi visível a olho nu por alguns dias. (Fonte: AAVSO e autor *em vermelho*).

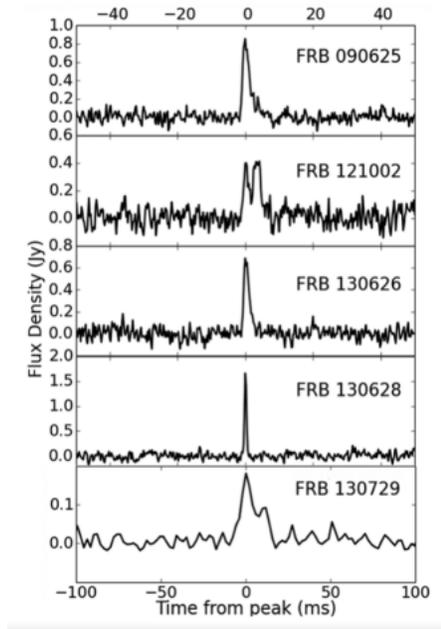


Figura 14 – Uma amostra de *Fast Radio Bursts* (FRB), que são transientes super rápidos observados em frequências rádio por volta de 500 MHz. Note que a duração pode ser bem curta, alguns milissegundos apenas, sendo que na maioria, não são repetitivos. (Fonte: Rev. Mod. Phys. 95, 035005, 2023).

O outro tipo de variabilidade é recorrente, ou periódica. É ilustrada pelas figuras 15 e 16. Na primeira são mostrados os eclipses periódicos quando, na nossa linha de visada uma estrela passa em frente à outra. Na segunda, vemos as variações da luz produzida por uma estrela de nêutrons girando rapidamente. Note também que tanto na figura 13 quanto na 15 o eixo vertical está expresso no sistema de magnitudes, como definido na equação 2.12.

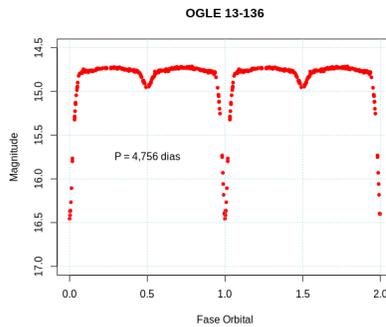


Figura 15 – As variações de luz no sistema binário OGLE 13-136, com repetições bem marcadas à cada 4,756 dias. Como o plano orbital desse sistema é inclinado de tal forma que uma estrela passa em frente à outra na linha de visada a nós à cada órbita, vemos eclipses alternados de um objeto mais luminoso (em torno de fase=1) e de um menos luminoso em fase 0,5. (Fonte: autor.)

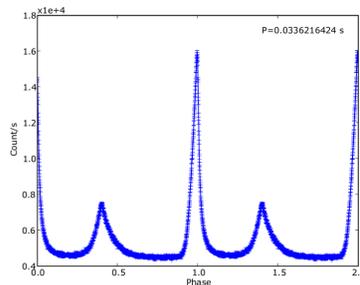


Figura 16 – A variação da intensidade dos pulsos ópticos do pulsar do Caranguejo à medida que a estrela de nêutrons roda. O período de rotação é 33,6 milissegundos. (Fonte: Elaboração do autor.)

2.3 Efeitos de diluição em ondas e radiação

2.3.1 O meio ambiente e o espectro acústico

É uma experiência bem comum a percepção de que a intensidade do som diminui muito à medida que o observador se afasta da fonte sonora. É muito difícil ouvir um piano a um quilômetro de distância, por mais silencioso que seja o ambiente. A razão é explicada por uma analogia mostrada na figura 17, em que uma pedra é jogada num lago e um barquinho, colocado à diferentes distâncias, é chacoalhado pela onda que se propaga. Note que quando o barco está distante, a fração do círculo interceptada pelo barco diminui, e ele chacoalha menos. Você pode provar facilmente, considerando o lago uma superfície bidimensional (2-D) onde a onda se propaga, que a energia por unidade de comprimento recebida por um observador distante cai com o *inverso da distância*. De modo geral, a energia recebida por um detector qualquer *diminui com a distância à fonte*. Se a fonte emite em *todas as direções no espaço* (3-D), a energia diminui com o *quadrado* da distância à fonte. Isso é ilustrado em forma gráfica na figura 18.

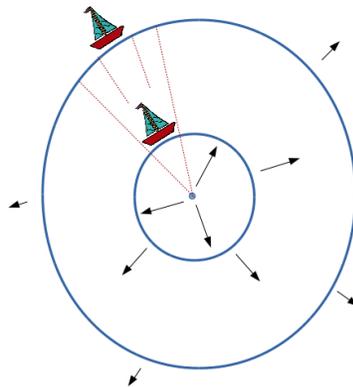


Figura 17 – A diluição da energia da onda (por unidade de comprimento) com a distância à fonte. (Fonte: autor.)

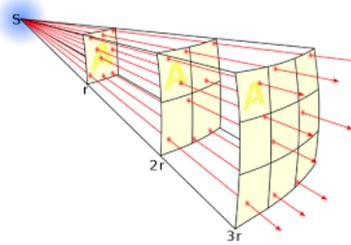


Figura 18 – A diluição da energia (por unidade de área) com a distância à fonte. (Fonte: <http://projetosfisicaexperimental.blogspot.com.br/2016/03/leido-inverso-do-quadrado-da-distancia.html>).

O observador perspicaz percebe também que as intensidades de certas frequências sonoras são mais atenuadas que outras. Isso quer dizer que devem existir outros fatores que produzem diminuição da intensidade das ondas. Um deles é a *absorção seletiva*. Um exemplo de absorção entre o observador e a fonte de ondas sonoras é uma parede. No caso de edifícios de apartamentos, nem sempre a absorção suprime completamente o som.

2.3.2 A atmosfera da terra e o espectro eletromagnético

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

$$\left(\frac{\text{distância [Alfa Centauri]}}{\text{distância [Sol]}} \right)^2 = \left(\frac{4 \times 10^{16} \text{ m}}{1,5 \times 10^{11} \text{ m}} \right)^2 = 7 \times 10^{10} \quad (2.13)$$

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

A radiação eletromagnética também é absorvida pela atmosfera terrestre. No caso da luz, isso é bem fácil de ver com o seguinte

exemplo: Ao meio dia, não conseguimos olhar para o Sol (mesmo que conseguíssemos, não seria saudável fazê-lo). Mas ao pôr do sol é muito mais fácil fazê-lo. Ao entardecer a luz tem que atravessar um caminho muito mais longo dentro da atmosfera e sofre maior atenuação. Veja esquematicamente na figura 19 como isso acontece. A luz também sofre atenuação diferente em frequências diferentes. A luz vermelha é menos atenuada que a luz azul, de modo que vemos o sol avermelhado ao entardecer porque mais luz vermelha chega até nós. O principal processo físico em jogo nesse caso é o *espalhamento*, que explica também a cor azul do céu sem nuvens. A luz pode ser atenuada também por *absorção pura* em raias atômicas ou em bandas moleculares. Nesse caso, as frequências envolvidas são muito bem definidas e representam uma espécie de “impressão digital” do átomo ou molécula que a produziu.

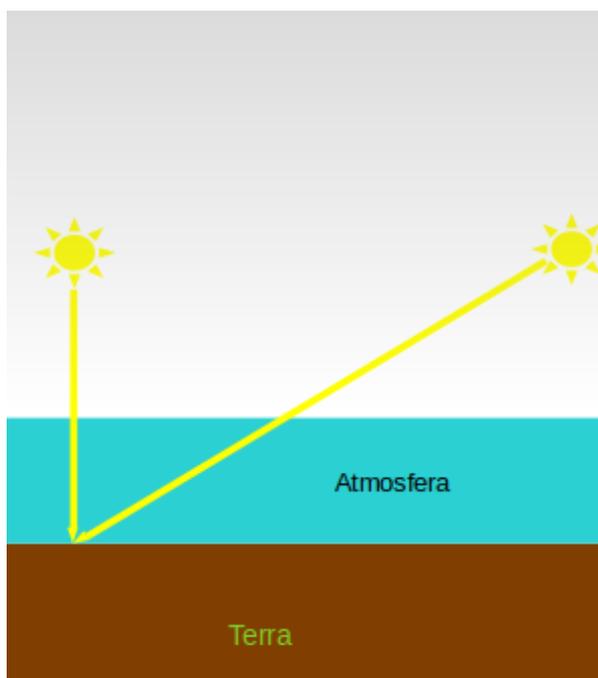


Figura 19 – O caminho mais longo produz mais atenuação da luz ao atravessar a atmosfera terrestre. (Fonte: autor.)

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

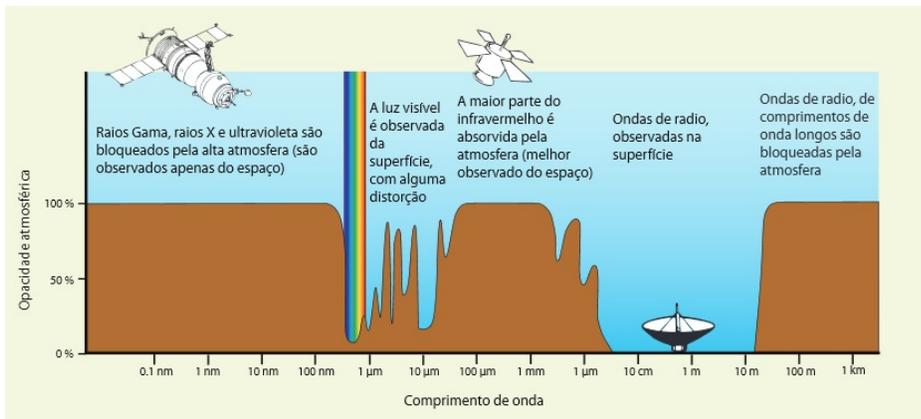


Figura 20 – As janelas de observação a partir do solo.
(Fonte: <http://www.lna.br/~museuvirtual/evolucao.html>.)

Se por um lado estamos vivos porque a atmosfera da Terra nos protege das radiações nocivas, por outro lado, a própria atmosfera impede que observemos do solo certas frequências do espectro eletromagnético emitidas pelos corpos celestes. Isso ocorre no ultravioleta, raios X, raios gama, infravermelho e rádio. A figura 20 mostra as “janelas” no espectro eletromagnético pelas quais podemos observar o universo a partir de observatórios no chão. Para observar a radiação eletromagnética nas regiões absorvidas pela atmosfera a única solução é colocar o “observador” fora dela! Essa é uma das razões pelas quais o Telescópio Espacial Hubble foi colocado em órbita. O INPE opera um centro de lançamento de balões que conse-

gue levar instrumentos a mais de 40 km de altura, deixando para trás cerca de 99% da atmosfera.

A atmosfera terrestre apresenta um outro efeito importante nas observações feitas do solo. Pelo fato de não ser absolutamente homogênea, apresentando variações de densidade, movimentos devido a ventos, etc., ela produz efeitos de refração variáveis, que somados, acarretam na degradação das imagens produzidas pelos telescópios. O fenômeno é menos pronunciado em comprimentos de onda mais longos, e um grande esforço tem sido feito para dotar os observatórios de meios de “driblar” essa limitação. São os sistemas de *óptica adaptativa* que respondem em tempo real às distorções produzidas pela atmosfera.

2.3.3 Absorção no meio interestelar

Apesar de bastante rarefeito, o espaço entre as estrelas não é completamente vazio, contendo gás (principalmente Hidrogênio) e grãos sólidos de materiais compostos por Carbono e também Silício.

Considerando que as distâncias entre as estrelas são muito grandes, a chance de que a luz vinda de uma fonte distante seja interceptada por esse material antes de chegar a nós é grande. A fig. 21 mostra a nossa galáxia em *coordenadas galácticas*, como se tivéssemos vendo-a de lado.

Como a região do plano da galáxia tem uma concentração de gás e poeira, a radiação é muito absorvida, especialmente nos comprimentos de onda mais curtos. Dizemos que a *extinção* na linha de visada ao centro da galáxia é maior que 30 magnitudes na faixa óptica do espectro eletromagnético. Já no infravermelho, a absorção é muito menor, permitindo vermos estrelas orbitando em torno do buraco negro central. A fig. 22 mostra uma imagem em uma banda de comprimentos de onda centrada em $1,65\mu\text{m}$ obtida com a câmara infravermelho no Observatório do Pico dos Dias (gerenciado pelo LNA/MCTI).

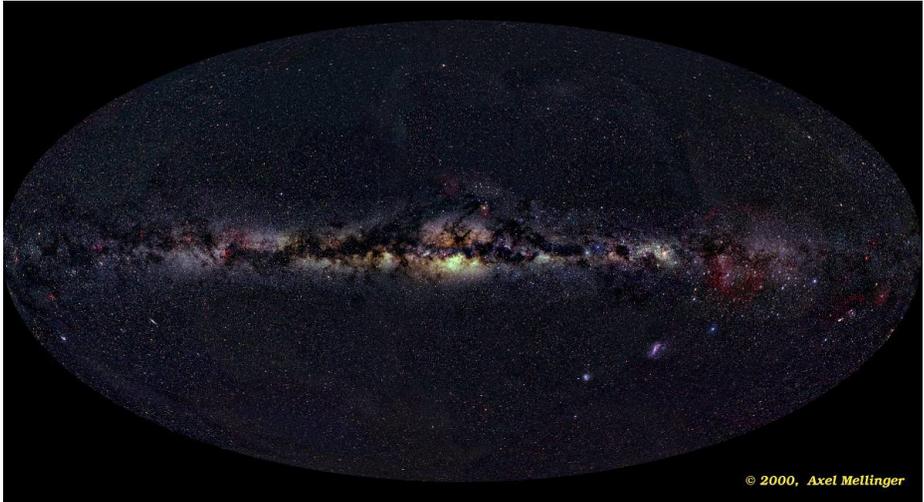


Figura 21 – A Via Láctea como vista em coordenadas galácticas. O complexo padrão de regiões escuras é produzido por absorção causada por gás e poeira no meio interestelar. (Fonte: Alex Mellinger, <https://apod.nasa.gov/apod/ap010202.html>.)

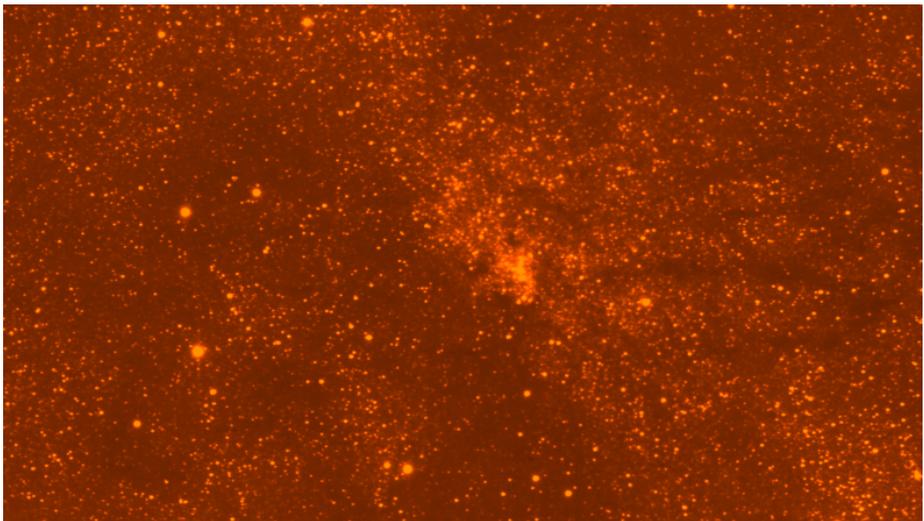


Figura 22 – Imagem na direção do centro galáctico em comprimentos de onda ao redor de $1,65\mu\text{m}$ obtida com a CamIV no OPD/LNA. Pode-se ver o aglomerado central que não pode ser observado em luz visível. (Fonte: autor).

2.4 Detectores e telescópios

2.4.1 Detectores de ondas sonoras

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

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

Neste ponto, é interessante lembrarmos de duas características básicas de um dispositivo de coleta de informação, independente de estar observando o espectro eletromagnético, o espectro acústico, o fluxo de partículas ou recebendo ondas gravitacionais. Primeiro, quanto maior a *área coletora*, maior a capacidade do instrumento de coletar informação. Isto significa que para um telescópio (ou antena) com diâmetro D , a quantidade de radiação coletada é proporcional a D^2 . O outro ponto é que a capacidade de separar fontes próximas umas das outras é inversamente proporcional ao diâmetro. Em termos numéricos, dizemos que o ângulo mínimo sob o qual podemos separar uma fonte pontual de outra é

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D} \text{ radianos,} \quad (2.14)$$

onde λ é o comprimento de onda da radiação, e D o diâmetro do telescópio.

2.4.2 Detectores e telescópios para ondas eletromagnéticas

O detector mais elaborado que possuímos no corpo é o olho. A combinação olho + cérebro faz simultaneamente uma análise do espectro da luz e sua distribuição espacial e de intensidade com boa resolução no tempo. O olho produz imagens. O princípio de detecção é baseado em células especializadas que enviam sinais elétricos ao cérebro quando são atingidas por luz.

Como vimos antes, o espectro eletromagnético cobre uma vasta faixa de frequências. O princípio de detecção pode ser diferente para diferentes frequências. Nos detectores de ondas de rádio, por exemplo, o que se mede é o deslocamento de cargas elétricas num condutor, na presença da onda eletromagnética. Esse condutor se chama antena e pode ter formas variadas, mas o objetivo é sempre o mesmo, oferecer uma área exposta à onda eletromagnética. Quanto maior a área da antena, mais energia eletromagnética pode ser captada.

A figura 23 mostra esquematicamente as principais partes de um conjunto antena + detector rádio. O elemento fundamental para a detecção nesse exemplo, além da antena, é o *detector quadrático*, que pode ser tão simples quanto um diodo, ou seja, dispositivo elétrico que conduz a corrente induzida pelo sinal de radiofrequência apenas em um sentido.

O INPE opera um rádio observatório que possui uma antena parabólica de 13 metros de diâmetro capaz de observar ondas de rádio em frequências de dezenas de GHz. O maior radiotelescópio do mundo atualmente está na China, e tem uma antena de 500 metros de diâmetro. A figura 24 mostra uma configuração para detecção de ondas de rádio que foi projetada e construída na Divisão de Astrofísica do INPE: é uma das 50 antenas do experimento BINGO, que estudará a radiação dos estágios iniciais da evolução do universo.

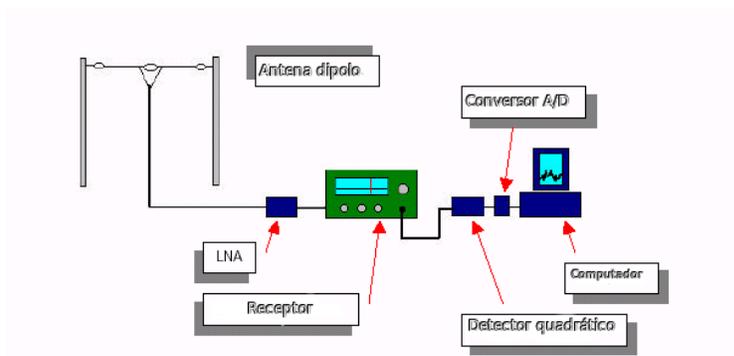


Figura 23 – O esquema de um conjunto antena + receptor rádio. A antena neste caso é um dipolo. As ondas eletromagnéticas excitam o movimento de elétrons nela e para se ter um sinal não nulo a corrente elétrica passa por um elemento sensível apenas a um sentido de deslocamento, ou também ao quadrado da amplitude do sinal. Dessa forma, qualquer resultante pode ser convertida em sinal digital para ser registrada no sistema de aquisição de dados. (Fonte: Elaboração do autor.)



Figura 24 – Uma das 28 antenas do radiotelescópio BINGO, construída sob supervisão técnica da DAS/INPE. (Fonte: L. Reitano.)

Nas frequências correspondentes à luz visível, os detectores são capazes de registrar os pacotes individuais de energia associados às ondas eletromagnéticas. Esses pacotes são chamados de *fótons*. O detector que existe dentro da câmara de nossos celulares é capaz de fazer isto, ou seja, é capaz de registrar e discriminar luz de frequências diferentes, e pelo fato de ser dividido espacialmente em muitas células básicas, pode fornecer informação da direção e intensidade da fonte emissora de luz. A figura 25 mostra o princípio de funcionamento. Na parte esquerda, temos um *semicondutor*, material que se comporta eletricamente de maneira intermediária entre um isolante e um condutor. Nesses materiais, os portadores de carga podem ser tanto elétrons quanto ausência de elétrons (lacunas na rede cristalina). Quando juntamos as duas partes, temos uma *junção semicondutora*. Esse tipo de junção tem uma propriedade interessante: se for aplicada a ela uma tensão reversa com relação à mobilidade das cargas, passa a funcionar como um capacitor, ou seja, não conduz corrente contínua. Forma-se uma região entre as duas partes pela qual não atravessam cargas elétricas; é a chamada *região de depleção*.

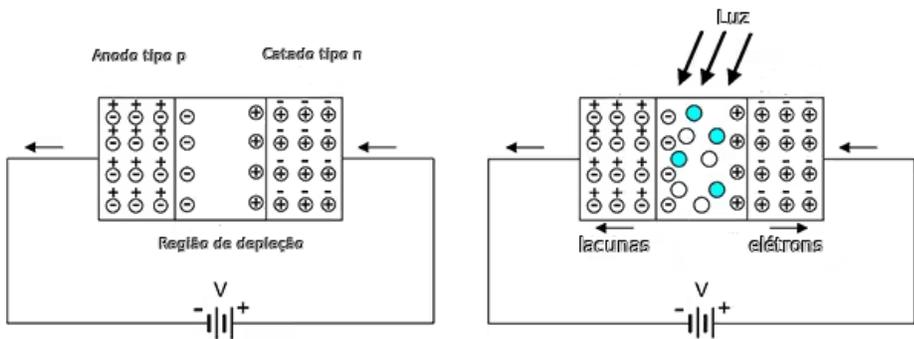


Figura 25 – O princípio de funcionamento de um detector baseado em semicondutor: a criação de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons pode ser medida por circuitos de amplificação externos. (Fonte: Adaptado pelo autor de: <https://www.digikey.pt/pt/articles/the-basics-of-photodiodes-and-phototransistors-and-how-to-apply-them.>)

Na parte direita da figura temos uma ilustração do que ocorre quando luz incide sobre a região de depleção. Se os fótons são suficientemente energéticos, criam pares elétron-lacuna que naturalmente se separam, por conta da diferença de potencial aplicada à junção, criando uma corrente que pode ser medida por um circuito externo. É o princípio de funcionamento de uma variedade de sensores, como fotodiodos, CCDs e dispositivos CMOS. Uma característica notável desse tipo de detector é que pode ter resposta linear em resposta ao sinal recebido ao longo de várias décadas do estímulo. A *eficiência* na detecção também é muito grande, podendo chegar perto de 100%. Comparativamente, apesar de nosso olho ser uma maravilha da Natureza, a eficiência é da ordem de porcentos apenas. A figura 26 mostra uma comparação entre a *resposta espectral* de três tipos de detectores de luz: o olho humano, um sensor CCD e um sensor do tipo HAWAII-1, como o existente na câmara infravermelho operada no Observatório do Pico dos Dias do LNA/MCTI.

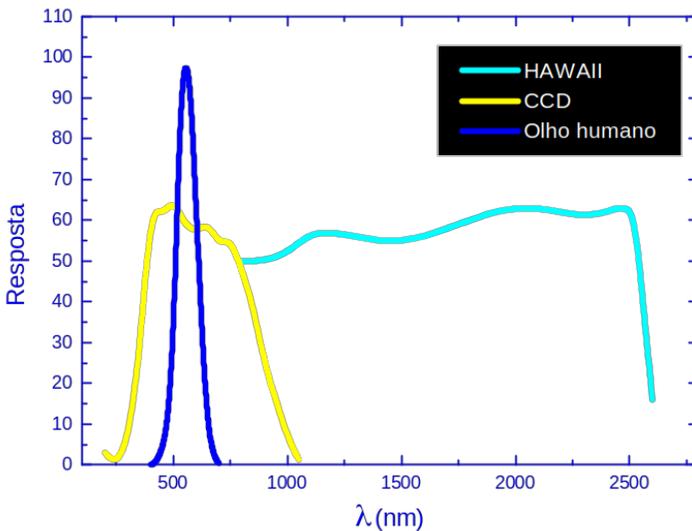


Figura 26 – A sensibilidade espectral em função do comprimento de onda para o olho humano, normalizada a 100% para facilitar a visualização, um sensor tipo CCD e um sensor no infravermelho próximo. (Fonte: autor).

Mas, para que então precisamos de telescópios? Não bastaria o detector sozinho para registrar a intensidade, frequência e direção da radiação eletromagnética? A resposta está no fato de que em Astronomia, é quase a regra estarmos na situação do surdo, não por falta de sensibilidade no detector, uma vez que os mais elaborados sistemas de amplificação são utilizados, mas porque as fontes celestes de radiação são extremamente fracas. A única maneira de remediar é aumentar a quantidade de radiação coletada. Esses aparelhos se chamam genericamente de *telescópios* ou *antenas*, conforme a faixa do espectro que estiver sendo estudada. Na Divisão de Astrofísica do INPE existem pesquisas em andamento utilizando telescópios para ondas de rádio, para luz visível, infravermelha, para raios X e ondas gravitacionais.

A figura 27 mostra esquematicamente o "telescópio" mais simples que pode ser construído, com instruções mais detalhadas na figura 28. Ele funciona muito bem para luz e é capaz de registrar imagens. O único requisito é que as dimensões da abertura sejam pequenas, porém algumas vezes maiores que o comprimento de onda da radiação.

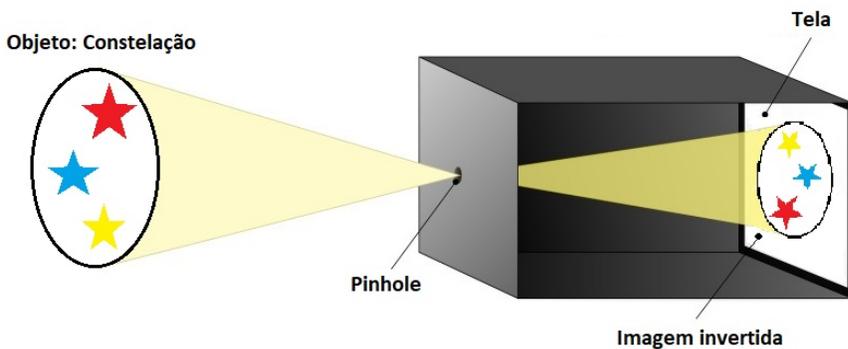


Figura 27 – Exemplo de uma câmara pinhole, ilustrando a determinação da intensidade e direção da radiação eletromagnética. (Fonte: Adaptado de <https://mirrorillusions.com>.)

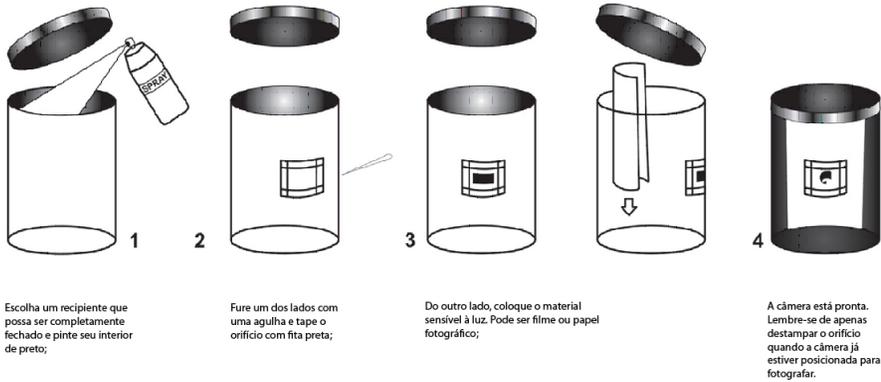


Figura 28 – Passo a passo de como construir uma câmara pinhole.
(Fonte: <https://www.jornalufgonline.ufg.br/n/30640-camera-pinhole>).

Esse tipo de montagem já teve muita popularidade em um contexto não científico. Antes do advento da fotografia as “câmeras obscuras” eram utilizadas para projetar imagens em vidros despolidos (foscas) e servir de guia para o artista na pintura de panoramas. Quanto menor for a razão entre o tamanho da abertura e a distância ao detector, mais detalhes o instrumento é capaz de discernir. A maior desvantagem desse tipo de “telescópio” é que a área coletora é muito pequena. A figura 28 mostra como você pode montar uma câmara escura para demonstração em sala de aula. Lembre que para esse tipo de aparelho funcionar bem é importante que a tela semitransparente receba o mínimo possível de luz externa. Na Divisão de Astrofísica do INPE está sendo construído um telescópio de raios X que utiliza o princípio de funcionamento da câmara escura. Para melhorar sua capacidade de captar energia o anteparo de entrada contém uma grande quantidade de furos e as imagens completamente embaralhadas que são projetadas na tela de saída são separadas através de um programa no computador. A figura 29 mostra o telescópio ProtoMirax com o padrão de aberturas já instalado na parte superior.



Figura 29 – O telescópio ProtoMirax para raios X, com o padrão de aberturas na parte superior. (Fonte: Elaboração do autor).

Galileo Galilei foi o responsável pela divulgação de uma invenção que resolveu os problemas de registrar a direção de chegada da luz e ao mesmo tempo, captar o máximo de luz. Trata-se do uso de uma *lente*. A lente é capaz de ter uma área coletora muito maior que a da abertura circular mostrada na figura 27, mantendo a capacidade de separar raios vindos de direções diferentes. Nas lojas de lembranças é fácil encontrarmos lupas que podem ser usadas como lentes (o termo técnico é *objetiva*) para um telescópio simples. A figura 30 ilustra como montar.

Para determinar o comprimento do tubo que compõe a parte externa do telescópio meça primeiro a distância da lente em que uma vela bem iluminada forma uma imagem bem definida. Se você utilizar dois tubos de diâmetros diferentes, um podendo se deslocar com relação ao outro, pode focalizar precisamente seu instru-

mento. Se em vez do papel semitransparente você tivesse um filme fotográfico na parte posterior do dispositivo, o aparelho se chamaria “câmara fotográfica”. Se tivesse um detector CCD ou CMOS teria uma câmara digital.

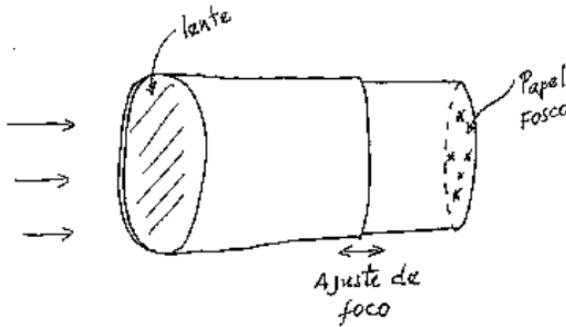


Figura 30 – Esquema de um telescópio simples. (Fonte: autor).

O telescópio de 1,6 metros de diâmetro instalado no Pico dos Dias no Sul de Minas Gerais e gerenciado pelo LNA/MCTI (figura 31), funciona exatamente segundo o mesmo princípio, apenas que em vez de uma lente para focalizar a luz, possui espelhos.

Os espelhos são vantajosos porque não absorvem luz como as lentes, e podem ser construídos com dimensões muito grandes. O Brasil é sócio, podendo utilizar uma fração de 6% do tempo de observação, de dois telescópios de 8 metros de diâmetro cada um. Trata-se do *Projeto Gemini*, que envolve os Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Chile, Argentina e Brasil. Um dos telescópios opera nos andes chilenos, no Cerro Pachon, à 2700 m de altitude e o outro numa montanha de 4200 metros de altitude no Havaí. A figura 32 mostra uma vista de dentro da cúpula do Gemini Sul.



Figura 31 – O telescópio de 1,6 m de diâmetro do Laboratório Nacional de Astrofísica, no Pico dos Dias, Sul de Minas Gerais. (Fonte: autor).



Figura 32 – O telescópio Gemini Sul, de 8 m de diâmetro, no Cerro Pachon, 2720 m de altitude. (Fonte: <https://www.gemini.edu/gallery/media/whole-telescope>).

O Brasil também é sócio de outro projeto de colaboração internacional: o telescópio *SOAR* (*Southern Astrophysical Research*) de 4,1-m de diâmetro, instalado na mesma montanha em que está o Gemini Sul. A fig. 33 mostra o interior da cúpula do *SOAR*.



Figura 33 – O telescópio *SOAR* de 4,1 m de diâmetro, instalado no Cerro Pachón, a 2700 m de altitude. (Fonte: <https://noirlab.edu/public/images/Figure-1c-CC/>).

O telescópio GMT (do inglês, *Giant Magellan Telescope*, figura 34), que vai operar dentro de alguns anos nos andes chilenos e no qual os astrônomos do estado de São Paulo têm participação, possui um espelho composto que é equivalente à uma abertura de 25,4 metros de diâmetro! Astrônomos da DAS/INPE participam desse projeto.

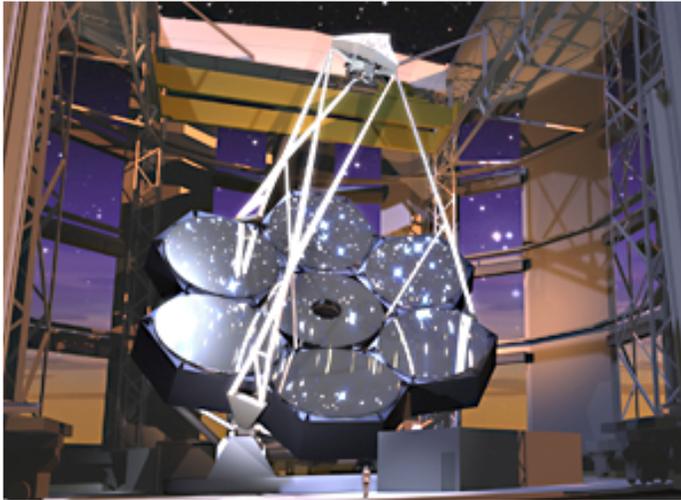


Figura 34 – Visão artística de como será o GMT, com abertura de 25,4-m de diâmetro. (Fonte: <https://www.gmto.org/>).

Exercício: Quantas vezes mais luz o telescópio do Projeto GMT é capaz de captar com relação ao telescópio instalado no OPD/LNA?

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

$$\frac{\text{Area GMT}}{\text{Area OPD}} = \left(\frac{25,4}{1,6} \right)^2 = 250 \text{ vezes mais luz!} \quad (2.15)$$

Tendo em vista que além de maximizar a área coletora, seria desejável operar os telescópios, especialmente em solo, onde não há as mesmas limitações de tamanho e massa que existem para lançar um instrumento ao espaço, de forma a concentrar da melhor maneira possível a energia recebida sobre poucos elementos de resolução no plano focal (equação 2.14). Os efeitos indesejados da turbulência atmosférica degradam as imagens a ponto de tornar o poder de resolução de um telescópio de 4 metros de diâmetro

praticamente equivalente à resolução de um telescópio de 40 m. Há uma resposta para isso? Sim, existe uma técnica, utilizada em muitos observatórios em funcionamento atualmente, chamada de *óptica adaptativa*.

Ela consiste em monitorar o comportamento da turbulência observando um objeto brilhante (portanto com pequena incerteza no sinal) próximo ao alvo científico, que pode ser fraco ou um objeto extenso. A figura 35 nos ajuda a entender o funcionamento. Imagine que a cada raio de luz proveniente de um objeto distante esteja associada uma *frente de onda*, por definição, perpendicular a ele. Ao atravessar a atmosfera terrestre e ser coletada pelo telescópio (ao alto, à esquerda) ela sofre deformações, que acabam prejudicando a qualidade da imagem formada no plano focal. Mas se a meio caminho, interceptarmos parte do feixe incidente com um divisor de feixe, podemos monitorar o estado dessa frente de onda, o que é representado pelo padrão em laranja. Isso é feito à uma taxa de amostragem da ordem de kHz, de modo a termos uma boa ideia da amplitude das flutuações atmosféricas. A porção do feixe que atravessa o divisor incide sobre um espelho de pequenas dimensões que é deformável, e pode se adaptar a deslocamentos exatamente opostos às deformações da frente de onda. Agora, o restante do feixe que é refletido por esse espelho tem a frente de onda corrigida, e pode ser dirigido ao plano focal, produzindo uma imagem corrigida dos efeitos mais sérios da turbulência.

Os resultados da utilização dessa técnica são notáveis. A figura 36 mostra uma imagem de Netuno obtida sem e com o sistema ativo. A qualidade rivaliza com o que foi obtido com o telescópio Hubble.

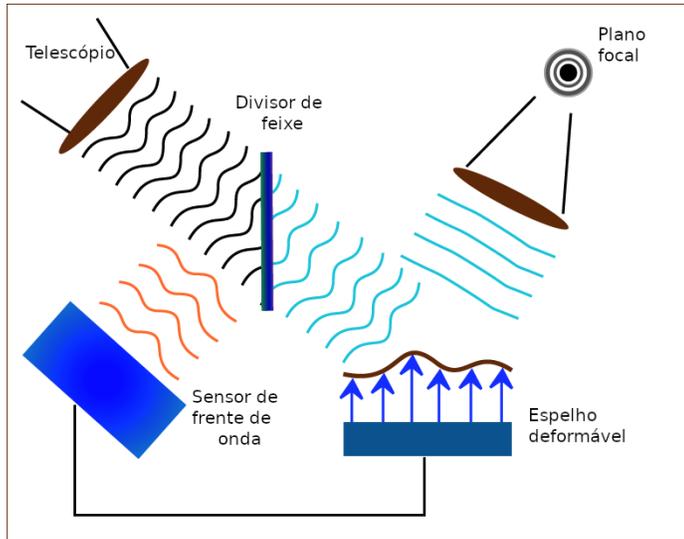


Figura 35 – Um diagrama esquemático para entender o funcionamento da óptica adaptativa num telescópio (ver texto). (Fonte: J. Steiner, adaptada pelo autor).

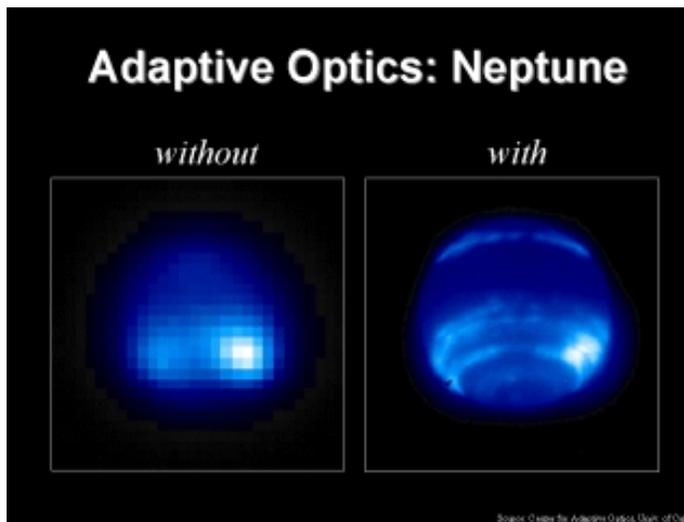


Figura 36 – Óptica adaptativa em funcionamento no telescópio Keck de 10-m no Havaí. (Fonte: <https://www.unf.edu/n00006757/astronomylectures/atmoseffects4b.htm>).

As medidas via óptica adaptativa no infravermelho dos movimentos orbitais de estrelas em torno do buraco negro no centro da nossa galáxia permitiram a determinação da massa desse corpo: mais de 2 milhões de massas solares! Trata-se de uma descoberta retumbante, que ilustra de forma brilhante a diversidade dos fenômenos e das configurações no Universo. A figura 37 mostra a determinação da posição de diversas estrelas ao longo do tempo, com as velocidades correspondentes no painel direito.

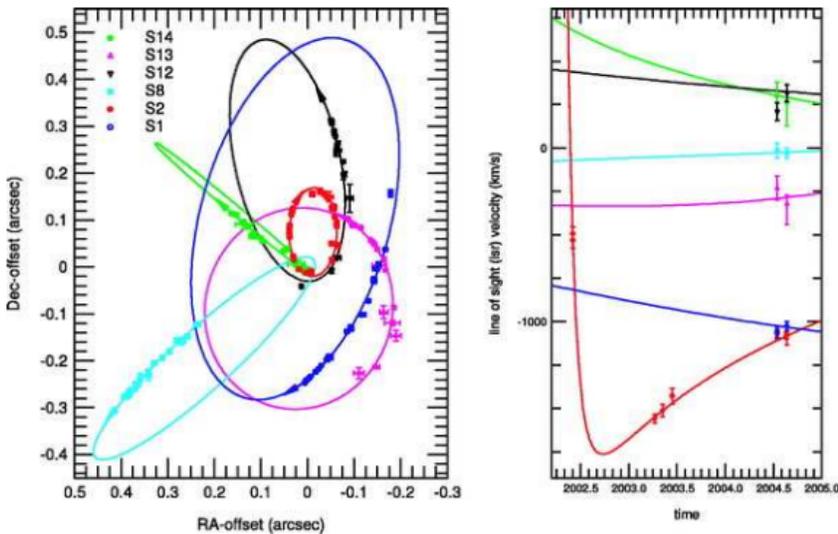


Figura 37 – Resultados das medidas astrométricas, usando óptica adaptativa no infravermelho, da posição de estrelas que orbitam o buraco negro no centro da nossa galáxia. A aplicação da 3ª lei de Kepler indica que o objeto tem uma massa superior a 2 milhões de massas solares. (Fonte: Alexander, T., PRRA, 2005).

2.5 Epílogo

Para termos uma ideia dos avanços que a Astrofísica Observacional teve ao longo do último século, precisamos nos referir a um contexto mais amplo, da Astronomia como um todo, ou até mesmo da Física teórica e experimental.

As medidas de posição, por exemplo, já eram bem elaboradas no início do século XX, permitindo medir a distância à algumas estrelas por triangulação. As medidas mais precisas eram capazes de resolver ângulos de 1/100 de segundos de arco.¹⁸ Nesse campo, o progresso revolucionário ocorreu nas últimas décadas, com o lançamento ao espaço de satélites como o *Hiparco* e *Gaia*. Este último permite medir ângulos com precisão de 25 *microsegundos* de arco para estrelas de até magnitude 15. Essa qualidade permite a elaboração de mapas 3-D da nossa galáxia e estabelecer uma régua segura para a medição de distâncias cósmicas. Lembremos que há 100 anos, debatia-se sobre a ideia de nossa galáxia ser o centro do Universo ou não. Esta frase de um livro didático dos anos 1920 é ilustrativa:

Só romancistas, a fantasiar longe da realidade, podem falar em outras Vias lacteas collocadas a distancias incommensuráveis; pelo contrario, tudo nos autorisa a crer experimentalmente que o mundo sideral é um systema finito, de dimensões mediveis.

O conhecimento sobre a natureza do nosso Sol também ilustra a profundidade que alcançamos ao longo do último século sobre o que são as estrelas. Embora a distância ao Sol, e portanto suas enormes dimensões, já estivessem bem estabelecidas em 1769 com os trânsitos de Vênus, a fonte de energia permaneceu desconhecida por mais de 150 anos ainda. Novamente, a citação de um livro didático do começo do século XX:

Geralmente, admite-se hoje que a materia solar estava outrora espalhada numa esphera de raio immenso. Da contracção dessa massa enorme resultou o calor solar; essa contracção ainda não parou e vai continuando a realisar-se.

Em outras palavras, acreditava-se que a fonte de energia do Sol era a contração gravitacional. Somente com as contribuições de

¹⁸Lembrar que 1 segundo de arco equivale a 1/3600 de grau.

Einstein (com a célebre equação $E = mc^2$), Rutherford, Eddington, Gamow e Bethe, estabeleceu-se o conhecimento de que essa fonte são as reações nucleares.

O século XX presenciaria duas outras revoluções de grande impacto na Astronomia. A primeira foi o desenvolvimento da *Radio-astronomia* que mostrou aspectos completamente desconhecidos anteriormente da Natureza. Um exemplo foi a descoberta dos pulsares, e por consequência, das estrelas de nêutrons. Outro foi a descoberta da radiação cósmica de fundo, que consolidou o modelo de evolução do Universo a partir de um "Big Bang". O acesso à parte do espectro eletromagnético correspondente às ondas de rádio é análogo a abertura de uma janela pela qual a Humanidade nunca tinha olhado antes.

A segunda revolução foi a entrada na era do *processamento digital* das informações. O impacto dessa nova abordagem tanto no processo de aquisição quanto de tratamento das informações permitiu que um instrumento como o interferômetro LOFAR seja um praticamente um radiotelescópio digital. Da mesma forma, a aquisição e tratamento das imagens de telescópios no óptico e infravermelho via elaborados sistemas de processamento digital permitiram alcançar níveis de sensibilidade sem precedentes.

Por fim, vale lembrar que a Era de Ouro da Astrofísica Observacional ainda está longe do seu auge. O Observatório Vera Rubin, por exemplo, fará um senso inédito da variabilidade dos objetos celestes visitando o céu inteiro visível dos Andes chilenos a intervalos de poucas noites com um telescópio de 8,4-m de diâmetro e câmara imageadora de 3,2 Gigapixels. Estima-se que a estratégia observacional produza um milhão de descobertas de Supernovas por ano.

Embora com uma abertura de apenas 2,4-m, portanto igual à do atual Hubble Space Telescope, o Nancy Roman Space Telescope também terá enorme impacto na Astrofísica, pois acessará o regime do infravermelho do espectro eletromagnético a partir do espaço. A câmara imageadora de grande campo será usada tanto na investi-

gação da natureza da matéria e energia escuras quanto no estudo de exoplanetas. O prospecto de imageamento e espectroscopia diretos de exoplanetas colocará números fundamentais para a questão da probabilidade de vida em outros mundos.

A Astrofísica de Ondas Gravitacionais é uma das realizações mais notáveis da engenhosidade humana. Ainda, que dando seus primeiros passos, é perfeitamente previsível que a construção futura de uma rede de detectores para determinar a direção das fontes de eventos transientes, e conseqüentemente, permitir o estudo das características de tais fontes observando o espectro eletromagnético associado a eles. Os primeiros passos nessa direção, através do uso conjunto de observatórios como os LIGO, VIRGO e Kagra já foram dados.

A descoberta recente pelo consórcio NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves) da existência de um fundo estocástico de ondas gravitacionais deverá ser complementada nas próximas décadas pela emissão de ondas gravitacionais por sistemas binários de curto período e pulsares.



3. O Sistema Solar

Cláudia Vilega Rodrigues

3.1 Introdução

O Sistema Solar é formado por uma miríade de corpos. Quais e o que são esses astros? Como são classificados? Como se movimentam? Do que são formados? Qual sua origem? Atualmente o Homem já pode responder a algumas dessas perguntas com certa segurança. Nas próximas seções, vamos discorrer um pouco sobre o conhecimento atual que temos sobre o Sistema Solar.

3.2 A evolução do conhecimento sobre o Sistema Solar e um pouco de dinâmica

Os astros do Sistema Solar, principalmente o Sol, estão muito presentes em nosso cotidiano. A maneira como medimos o tempo, a nossa percepção visual e a nossa própria existência estão diretamente ligadas às condições existentes no Sistema Solar. A nossa visão está adaptada ao tipo de radiação eletromagnética – luz visível

– que é capaz de penetrar a nossa atmosfera (veja Capítulo “Astrofísica Observacional”). Essa radiação é também a mais emitida pelo Sol. A escala de tempo que utilizamos em nosso cotidiano é baseada nos ciclos do Sol e da Lua (veja Capítulo “Astronomia no dia a dia”). Até mesmo a energia encontrada na superfície terrestre é, em sua maior parte, proveniente do Sol.

Uma curiosidade que sempre esteve presente na Humanidade é entender o Universo que a cerca e do qual faz parte. O Sistema Solar, até há poucos séculos, constituía todo o Universo conhecido. É relativamente recente a noção de que as estrelas que vemos no céu são astros similares ao Sol, mas muito mais distantes. A observação do céu noturno, ainda na Antiguidade, mostrou ao Homem que alguns astros se movimentam contra um fundo de “estrelas fixas”. Esses objetos celestes foram chamados planetas pelos gregos, que significa astro errante. Para os gregos os planetas eram a Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, além do Sol, que também tem um movimento diferente daquele das estrelas. Hoje o significado da palavra planeta é diferente. Já faz alguns séculos que não mais chamamos a Lua de planeta. Plutão, por outro lado, deixou de ser classificado como planeta em 2006. A ciência é dinâmica, podendo revisar conceitos a partir de uma maior compreensão de uma questão científica. O fato de a Lua girar em torno da Terra já a coloca em uma classificação diferente da própria Terra, que gira em torno do Sol. Porém, por que Plutão, que gira em torno do Sol como a Terra, não é mais considerado planeta? O que são os hoje chamados planetas? Isso ficará claro na Seção 3.3 deste capítulo.

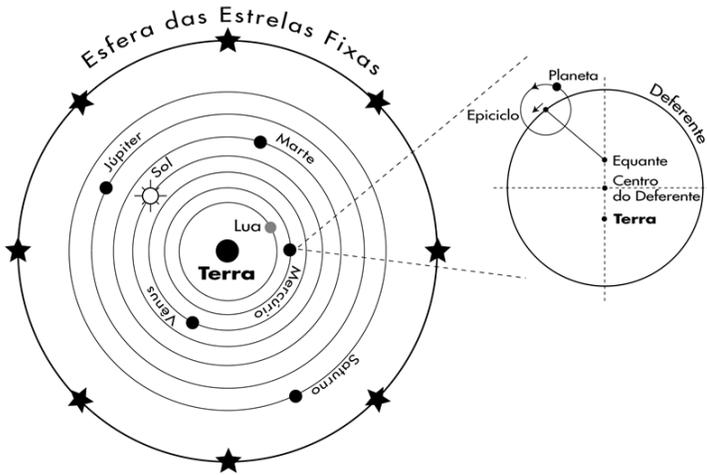


Figura 1 – O modelo geocêntrico. (Fonte: Elaboração da autora.)

Muito se pensou sobre a distribuição dos astros no céu e se ela de algum modo relaciona-se a uma organização do Universo. O modelo que dominou o pensamento filosófico europeu até o século XVI é o chamado modelo geocêntrico. Geo, em grego, significa Terra. Assim, o modelo geocêntrico é aquele que coloca a Terra no centro do Universo. Esse modelo foi sistematizado por Ptolomeu (astrônomo, matemático e geógrafo) no século II, a partir de ideias preexistentes. Nesse modelo, todos os astros orbitam em torno da Terra. É importante lembrar que o Universo dessa época era formado pelo Sol, Terra, planetas e estrelas fixas. O nosso conceito de Sistema Solar, como parte de um Universo muito maior, não existia então. Assim a Terra, ao ocupar o centro das órbitas dos “planetas”, define o centro do Universo e não apenas do que hoje chamamos Sistema Solar. A distância de um planeta à Terra era considerada proporcional ao tempo gasto por ele para completar uma volta ao redor da Terra, isto é, retornar ao mesmo ponto do céu em relação às estrelas fixas. Assim, chegava-se à representação do Universo esboçada em duas dimensões, na Figura 1. As estrelas fixas ficavam todas a uma mesma distância, muito maior do que a do planeta considerado o mais distante na época, Saturno. Hoje sabemos que a distância en-

tre uma estrela e a Terra pode ser muitíssimo diferente daquela de outra estrela aparentemente vizinha da primeira - veja o capítulo sobre estrelas (em outro volume) para mais detalhes. É importante destacar que o modelo geocêntrico não é apenas um modelo conceitual do Universo, é também um modelo matemático que reproduz com muita precisão as observações dos planetas. Não obstante, para explicar corretamente os movimentos e brilhos observados dos planetas, o modelo ptolomaico necessita de uma série de complicações geométricas, como os equantes e deferentes, que são também representados na Figura 1.

Com o objetivo de explicar com mais simplicidade o movimento dos planetas, o astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473–1543) propôs, em 1543, o modelo heliocêntrico: hélio, em grego, significa Sol. Nesse modelo, o Sol encontra-se no centro do Universo (como concebido então que, como dito anteriormente, equivale ao Sistema Solar) e os planetas orbitam ao seu redor. A única exceção é a Lua, que continuava orbitando em torno da Terra (veja a Figura 2). Outros pensadores, como Aristarcos de Samos (281 a.C.) e Nicolas de Cusa (1401–1464), já haviam proposto um Universo com o Sol na posição central, porém, sem maiores repercussões. Essas propostas, porém, não incluíam um tratamento matemático tão sofisticado quanto o de Copérnico, cujo modelo heliocêntrico explicava e previa os movimentos planetários tão bem quanto o modelo geocêntrico. Além disso, Copérnico determinou os raios e períodos das órbitas dos planetas com uma precisão muito boa (em comparação com os valores atuais), apesar de considerá-las circunferências, o que, como veremos adiante, não é correto. Hoje, essa configuração do Sol no centro com os planetas orbitando a sua volta nos parece bastante natural, mas esse modelo não foi muito bem aceito na época de Copérnico. Esse modelo tirava a Terra e, portanto o Homem, do centro do Universo. Ele era contrário a um paradigma de muitos séculos, baseado na tradição clássica, e seriam necessários argumentos fortes para modificar a visão ortodoxa do Universo da época.

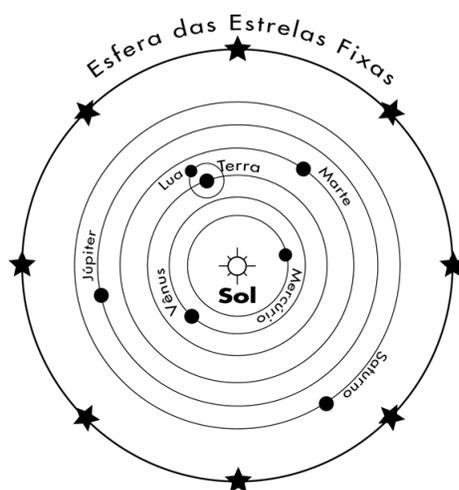


Figura 2 – O modelo heliocêntrico. (Fonte: Elaboração da autora.)

O astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564–1642), no início do século XVII, foi o primeiro a observar o céu com o auxílio de um telescópio. Deve ser notado que naquela época não se esperava que a observação do céu com um instrumento pudesse revelar algo de novo. Mas, Galileu mostrou que isso não era verdade: o céu se modifica ao ser observado com um telescópio. Os objetos celestes, na visão clássica, deveriam ser perfeitos, isto é, completamente esféricos e sem imperfeições em sua superfície e com movimentos também perfeitos, isto é, circulares e regulares. Mas, o céu observado por Galileu se mostrava mais complexo, imperfeito: Vênus possui fases; Júpiter tem satélites; Saturno tem disco; a Via Láctea é uma grande concentração de estrelas que se multiplicam com o poder de aumento do telescópio. Essas observações corroboravam o modelo heliocêntrico. Tanto por mostrar que a concepção conceitual anterior de um Universo “perfeito” não era correta, mas também com argumentos mais concretos. As fases de Vênus, observadas por Galileu, somente são entendidas pelo modelo heliocêntrico, isto é, o modelo geocêntrico não explica as observações das fases de Vênus. É importante também citar que Galileu obteve vários resulta-

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

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

- *Primeira Lei – Lei das órbitas elípticas:* A órbita de um planeta é uma elipse (veja quadro adiante) com o Sol em um dos focos. Assim, as distâncias entre um planeta e o Sol são variáveis ao longo da translação do planeta.
- *Segunda Lei – Lei das áreas:* Ao longo de sua órbita, um planeta possui uma velocidade variável de modo que a área coberta pela

linha que liga o Sol ao planeta é sempre a mesma em intervalos de tempo iguais (Figura 3).

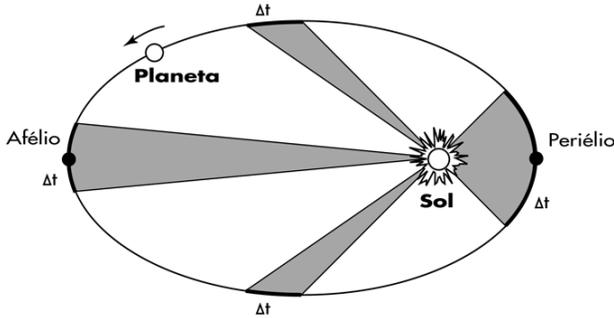


Figura 3 – Lei das áreas. (Fonte: Elaboração da autora.)

- *Terceira Lei – Lei Harmônica:* A razão, K , entre o cubo do semieixo maior da órbita de um planeta, a , e o quadrado do seu período de translação, P , é a mesma para todos os planetas:

$$\frac{a^3}{p^2} = K.$$

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

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

sendo:

F_G a força gravitacional; G a constante gravitacional; M_1 a massa de um dos corpos; M_2 a massa do outro corpo e R a distância entre os dois corpos.

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

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

sendo: \vec{F} a força; \vec{p} o momento; t o tempo; m a massa e \vec{a} a aceleração.

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

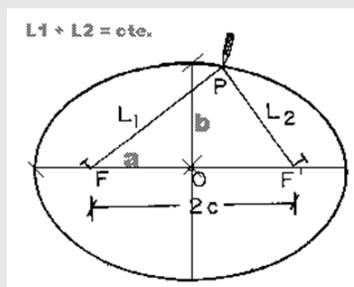
Essa força mantém a Terra ligada ao Sol e, por sua vez, a Lua, à Terra. De modo geral, o Sistema Solar possui um campo gravitacional produzido por todos os corpos que o compõe, mas que é dominado pela contribuição do Sol. Esse campo mantém todos os corpos (planetas, cometas, asteroides, entre outros) ligados. Mais do que isso, nas escalas astronômicas a força gravitacional é dominante e rege grande parte dos fenômenos celestes.

Newton, em sua teoria, também descreveu como um corpo se movimenta quando sujeito a uma certa força, qualquer que seja sua natureza. Isso é expresso pelas Três Leis do Movimento, que são enunciadas a seguir.

Essas leis são discutidas em qualquer livro de mecânica de graduação. Sugerimos, aos interessados, a leitura do “Curso de Física Básica: 1 – Mecânica” de H. M. Nussenzveig. Com esses dois fundamentos – a Lei da Gravitação Universal e as Leis do Movimento – foi possível entender a dinâmica do Sistema Solar: isto é, como e porque se dão os movimentos. No livro “Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”, também conhecido como “Principia”, Newton não só demonstra as leis de Kepler e explica quantitativamente fenômenos conhecidos como as marés e a precessão dos equinócios, mas também prevê e determina a forma achatada da Terra. A partir daí, estava aberto o caminho para o desenvolvimento da astronomia (e da física) moderna.

DEFININDO UMA ELIPSE

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



A excentricidade, e , de uma elipse é definida como: $e = \frac{c}{a}$.

A circunferência é uma elipse de excentricidade zero. Nesse caso, os pontos F e F' coincidem entre si e com o centro da circunferência. Nesse caso, também, os comprimentos dos segmentos L_1 e L_2 são iguais entre si e iguais ao raio da circunferência.

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

Uma grande parte do nosso conhecimento do Sistema Solar, em particular o referente aos planetas e seus satélites, é proveniente da exploração espacial iniciada por volta de 1960. Várias sondas passaram muito próximas ou pousaram em planetas, satélites e mesmo cometas do Sistema Solar, o que contribui de modo inigualável para nossa compreensão dessa pequena parte do Universo que nos rodeia.

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

3.3 Descrição do Sistema Solar

O Sistema Solar inclui o Sol e os planetas, mas abrange bem mais do que isso. Os cometas, asteroides, planetoides, entre outros objetos, compõem o Sistema Solar. Nesta seção vamos falar um pouco sobre cada uma dessas classes de objetos. Porém, vamos inicialmente discutir um pouco as características do Sistema Solar como um todo.

Como podemos definir o que é e como é composto o Sistema Solar? No Universo, a distribuição e hierarquia dos objetos são regidas basicamente pela força gravitacional. O Sol é formado por uma grande quantidade de matéria concentrada em uma região relativamente pequena: o Sol concentra cerca de 99,86% de toda a massa do Sistema Solar. Assim, ele é um foco de atração gravitacional em torno do qual orbitam vários corpos. Consequentemente uma das definições para o Sistema Solar é: o conjunto de todos os corpos (ou matéria) cujo principal centro de atração gravitacional é o Sol. Ela não é a única, mas é uma definição muito boa.

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

Enquanto a maior parte da massa do Sistema Solar está concentrada no Sol, seu momento angular está praticamente todo concentrado nos planetas. Os planetas giram em torno do Sol no mesmo sentido que o Sol gira em torno de seu eixo. Falando em linguagem astronômica, o sentido de rotação do Sol é o mesmo da translação dos planetas. Esse sentido é chamado prógrado. Mas nem todos os planetas rotacionam (giram em torno de si mesmos) nesse mesmo sentido. O sentido de rotação de Vênus e de Urano é contrário ao sentido prógrado, isto é, a rotação desses corpos é retrógrada.

Afirmamos anteriormente que os planetas giram em torno do Sol. Isto não é absolutamente correto. Os planetas giram em torno do centro de massa do Sistema Solar (veja quadro sobre centro de massa no Capítulo “Astronomia do dia a dia”). Aliás, o próprio Sol, além de rotacionar, também translada em torno desse centro de

massa. Em algumas configurações, o centro de massa do Sistema Solar pode estar a uma distância de dois raios solares do centro do Sol. Porém, na maior parte do tempo essa distância pode ser desprezada e o Sol pode ser considerado o centro do Sistema Solar.

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

3.3.1 O Sol

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

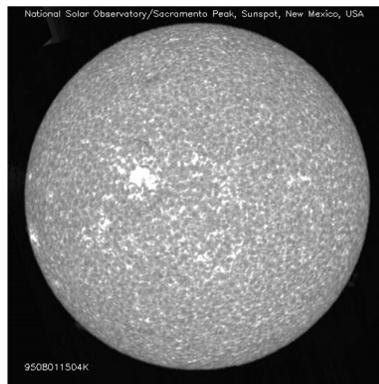


Figura 4 – Imagem do Sol na linha de emissão K do Call, obtida no *National Solar Observatory*. (Fonte: NSSDCA.)

Como já foi mencionado, o Sol é o centro gravitacional do Sistema Solar. Em torno dele orbitam os outros corpos e é o Sol que mantém o sistema coeso. Mas, o que é o Sol? O Sol é uma estrela. Dentre as estrelas existentes no Universo, o Sol pode ser classificado como uma estrela típica, entre as mais comuns que existem no Universo. Por ser uma estrela, o Sol é uma fonte de energia. De toda energia existente na superfície da Terra, a maior parte é proveniente do Sol que fornece 99,98% dela. O brilho dos corpos do Sistema Solar é constituído, basicamente, pela reflexão da luz solar em sua superfície. Isso é particularmente verdade se nos atermos ao brilho na região óptica do espectro eletromagnético (veja Capítulo sobre “Astrofísica observacional”).

O Sol é uma massa que se mantém coesa pela sua própria força de gravidade. O mesmo ocorre com os planetas. Por que a diferença, então? A resposta é que o Sol possui uma massa muito grande, grande o suficiente para que a pressão provocada pela força da gravidade torne tão altas as densidades e temperaturas em seu centro de modo que ocorrem reações de fusão nuclear com enorme produção de energia. É esse processo que caracteriza uma estrela e que não ocorre nos planetas. Veja mais detalhes sobre estrelas em um capítulo específico sobre elas em outro volume desta série.

O Sol é uma esfera gasosa cuja temperatura na superfície é de cerca de 5500 graus Celsius. No núcleo solar, a temperatura atinge 15 milhões de graus. Sua massa é 333 mil vezes maior que a da Terra, mas a sua densidade média é de apenas 1,41 gramas por centímetro cúbico, pouco maior que a da água que é de 1 grama por centímetro cúbico, sendo menor que a da Terra. Sua massa é composta por 73% de hidrogênio, o primeiro elemento químico da tabela periódica e também o mais abundante no Universo. O restante é constituído basicamente por hélio. Apenas 0,1% da massa do Sol é composta por elementos mais pesados. A Tabela 1 mostra alguns dados relativos ao Sol.

Tabela 1 – Alguns dados solares. (Fonte: NSSDCA)

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

* Veja na Tabela 3.4 os valores relativos à Terra.

É no núcleo solar, com sua altíssima temperatura, que ocorrem as reações nucleares de produção de energia. Essa energia é transportada até a superfície através de camadas que envolvem o núcleo, denominadas envoltórios. Na camada logo abaixo da superfície solar, ocorre um processo denominado convecção, através do qual o gás quente das camadas mais internas aflora à superfície. A convecção é uma das formas pelas quais a energia é transportada de um local para outro (ver quadro sobre Formas de Transporte de Energia). As porções mais internas do gás, aquecidas pela radiação que vem do núcleo, expandem-se e sobem até a superfície, onde perdem energia e esfriam. Ao esfriarem, tornam-se mais densas e pesadas, voltando a descer. É devido a esse processo, chamado convectivo, que a superfície do Sol se apresenta com um aspecto granulado que resulta de diferenças de temperatura: as regiões mais quentes são mais brilhantes que as mais frias. Podemos ver essa diferença de brilho na superfície solar na Figura 4.

FORMAS DE TRANSPORTE DE ENERGIA

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

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

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

Radiação: Uma outra maneira de transportar energia é através da radiação. Imagine-se em uma praia tomando refrigerante em lata em um dia quente de verão. Você deixou a latinha no sol e quando foi recolhê-la, ela estava muito quente. Nesse caso, foi a radiação (no caso solar) que aqueceu a lata, transportando calor do Sol para a lata.

O Sol encontra-se a uma distância média de 150 milhões de quilômetros da Terra. Isso equivale a cerca de 8 minutos-luz, isto é, a luz do Sol demora esse tempo para chegar à Terra. A segunda estrela mais próxima é Próxima Centauri, que se encontra a uma distância 270 mil vezes maior, assim sua luz demora 4 anos e 4 meses para chegar até nós! Pela sua proximidade, podemos estudar o Sol melhor do que qualquer outra estrela do Universo. Mais detalhes sobre o Sol são apresentados no capítulo específico sobre esse astro em outro volume desta série.

3.3.2 Os planetas e seus satélites

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

Com a definição acima, os planetas do Sistema Solar são oito. Em ordem decrescente de proximidade ao Sol são eles: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. Algumas de suas características orbitais são listadas na Tabela 2 e alguns dados físicos na Tabela 3. Cinco deles são observáveis a olho nu: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. A Lua também foi considerada um astro errante na antiguidade, mas pela definição atual, ela é um satélite: enquanto um planeta orbita em torno do Sol, um satélite orbita em torno de um planeta. Porém, do ponto de vista de composição e características físicas, os planetas e satélites podem ser muito parecidos. Ganímedes, por exemplo, é o maior satélite de Júpiter, com raio da ordem de 2.600 quilômetros, maior portanto que Mercúrio, que possui um raio de 2.440 quilômetros. Os planetas podem ser divididos em dois tipos: terrestres ou telúricos (similares à Terra) e gigantes ou jovianos (similares a Júpiter). Os planetas telúricos são: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte. Os jovianos são: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. Plutão, que foi até 2006 considerado um planeta, era um problema para essa classificação, já que não se enquadrava em nenhuma das categorias acima e, como veremos adiante, parece um grande cometa. Plutão é hoje considerado um planeta-anão. Abordaremos essa classe de objetos na Seção 3.3.3.

Tabela 2 – Alguns dados orbitais dos planetas. (Fonte: NSSDCA)

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

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

** Veja Seção 3.4 para definição de excentricidade.

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

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

Tabela 3 – Alguns dados físicos dos planetas. (Fonte: NSSDCA)

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

* Nesta tabela, os valores de massa referem-se à razão entre a massa do planeta e a da Terra. Isso também vale para o raio equatorial. O achatamento corresponde à diferença entre os raios equatorial e polar do planeta, em unidades de raio equatorial. Os valores para a Terra podem ser encontrados na Tabela 4.

A existência de uma atmosfera depende da massa do planeta e de sua temperatura. Esta, por sua vez, depende inicialmente da sua distância ao Sol. Os planetas menores e mais quentes (mais próximos do Sol) têm mais dificuldade em manter uma atmosfera. Além disso, os elementos mais leves escapam mais facilmente do planeta. Assim, os planetas telúricos tendem a reter quase que somente elementos mais pesados em sua atmosfera. Já os planetas gigantes conseguem reter uma maior quantidade de material atmosférico, inclusive os elementos mais leves. A atmosfera faz diminuir a variação de temperatura na superfície entre o dia e a noite, que é determinada pela irradiação solar. Quando a atmosfera é densa o suficiente, ela impede que o calor recebido do Sol durante o dia escape à noite, de modo que a queda da temperatura à noite é menor do que no caso em que não existe atmosfera.

Os planetas não possuem luz própria. Estritamente falando, podem possuir uma fonte muito pequena de energia, mas que não é originada pela fusão nuclear, que é a fonte de energia das estrelas.

A maior parte da energia que irradiam corresponde à luz do Sol que é refletida em sua superfície. Uma analogia possível é um farol de bicicleta, tipo olho de gato, que parece aceso quando alguma luz incide sobre ele. Os planetas podem, entretanto, possuir um pequeno excesso de energia com relação à recebida pelo Sol que pode ser de origem gravitacional ou radioativa. Esse excesso é maior nos planetas jovianos com relação aos internos.

Apesar de pequena, a energia interna dos planetas telúricos e dos grandes satélites é suficiente para modificar sua crosta através de atividade geológica como o vulcanismo e movimentos tectônicos. Outros mecanismos que determinam a aparência da crosta de um planeta ou satélite são: a erosão, causada pela atmosfera ou hidrosfera; e o crateramento, que se refere às marcas produzidas por colisão de pequenos corpos com a superfície do planeta. O crateramento ocorre em todos os planetas internos e satélites de superfície sólida. Desse modo, a análise da crosta desses corpos permite determinar a época de formação de um dado terreno e o estado atual de atividade do corpo, como veremos ao descrevermos alguns planetas. Os planetas jovianos não possuem crosta, pois são gasosos, e assim não há sentido em discutir os processos acima nos planetas gigantes.

Mercúrio

Mercúrio é o planeta mais próximo do Sol. Seu nome latino corresponde ao do deus grego Hermes, filho de Zeus. Bastante pequeno, é o menor entre todos os planetas (veja Tabela 3). Sua superfície está coberta por crateras resultantes do impacto de corpos menores. Por isso supõe-se que a atividade vulcânica tenha ocorrido apenas enquanto era um corpo jovem, até cerca de 1/4 da sua idade atual. Caso houvesse ocorrido atividade vulcânica recente, as lavas teriam coberto e apagado as crateras. Das inúmeras crateras existentes, destaca-se a Bacia Caloris, com 1.300 quilômetros de diâmetro, quase 1/3 do diâmetro do planeta que é da ordem de 4.890 quilômetros. Possui uma atmosfera muito tênue, quase desprezível,

por isso existe uma incrível variação da temperatura entre o dia e a noite: de -170 graus (lado oculto do Sol) a +430 graus Celsius (lado iluminado pelo Sol). Compare com a Terra, onde a variação é de de uma ou duas dezenas de graus, se tanto. Sua órbita é bastante ex-cêntrica, isto é, se desvia muito da forma circular, em comparação com as da maior parte dos planetas.

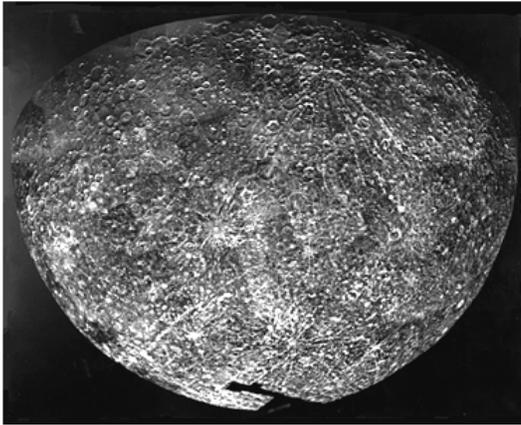


Figura 5 – Mosaico de imagens do planeta Mercúrio, obtidas com a sonda Mariner 10. (Fonte: NSSDCA.)

Venus

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

A atmosfera de Vênus é bastante espessa e reflete a maior parte da luz solar incidente. Essa é a razão do seu grande brilho. Sua atmosfera espessa também impede a observação direta da superfície do planeta. O raio de Vênus somente pode ser determinado com o uso de radares ou de sondas espaciais. Por ter um tamanho relativamente grande, seu manto é convectivo, pois não consegue dissipar o calor interno por condução, como acontece com Mercúrio (veja o quadro sobre as formas de transporte de energia). A convecção levou gases para a superfície, de modo a formar uma atmosfera composta basicamente por gás carbônico, CO_2 – quase 97% –, e gás nitrogênio, N_2 – 3%. O gás carbônico é responsável pela ocorrência do efeito estufa (veja quadro a seguir), que eleva a temperatura na superfície a $460\text{ }^\circ\text{C}$. Note que essa temperatura chega a superar a de Mercúrio que está mais próximo do Sol e que poderíamos imaginar que fosse mais quente. As nuvens de Vênus são formadas por várias substâncias, entre elas o ácido sulfúrico. A pressão atmosférica de Vênus é bastante alta, cerca de 100 vezes maior que a da Terra. Existem também evidências de vulcanismo, que está relacionado ao manto convectivo. Por tudo isso, a superfície de Vênus possui condições bem inóspitas.

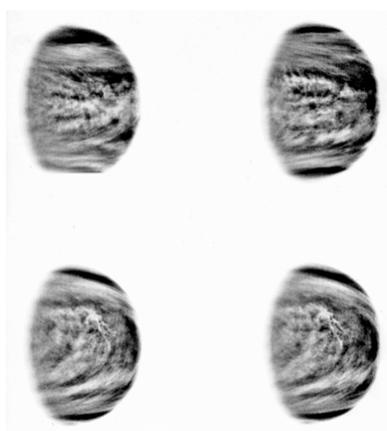


Figura 6 – O planeta Vênus observado pela sonda Galileo.
(Fonte: NSSDCA.)

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

A Terra

Terra é o nome da deusa romana, esposa do Céu, que em grego chama-se Gaia. Como já vimos, o planeta em que vivemos era considerado até o Renascimento como em posição privilegiada, em torno da qual o Universo se organizava. Com o avanço do nosso conhecimento, a Terra deixou de ocupar um lugar especial e passou a ser apenas um dos planetas de uma estrela comum, o Sol. Porém, ainda hoje é considerada particular, pela existência e complexidade da vida em sua superfície. É possível que isso também venha a se modificar com uma maior compreensão dos planetas extrassolares. A temperatura na Terra permite que a água exista no estado líquido em sua superfície¹. Aliás, o nosso planeta poderia ser chamado de planeta Água e não Terra, pois 3/4 de sua superfície são cobertos pela água. Apenas para se ter uma ideia da quantidade de água dos oceanos, se a superfície do planeta se aplainasse, o planeta seria coberto por um oceano de 400 m de profundidade. A água é um dos fatores essenciais que levou à existência da vida como a conhecemos.

¹Além da Terra, é possível que Europa, um dos satélites Galileanos de Júpiter, possua água no estado líquido sob uma crosta de gelo.

EFEITO ESTUFA

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

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

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



Figura 7 – Mosaico de imagens do planeta Terra, obtidas com a sonda Clementine. (Fonte: NSSDCA).

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

A Lua é um satélite relativamente particular dentro do Sistema Solar, pois possui um tamanho comparável ao da Terra. Sua massa

é apenas 80 vezes menor que a da Terra. Como exemplo podemos citar, Ganimedes, um dos satélites de Júpiter: sua massa é 10.000 vezes menor que a do planeta. O tamanho da Lua é apenas 1/4 do da Terra. Assim, do ponto de vista físico, o conjunto Terra-Lua poderia ser definido como um sistema binário.



Figura 8 – Imagem da Lua cheia obtida pela Apollo 11. (Fonte: NSSDCA.)

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

Tabela 4 – Alguns dados da Terra e da Lua. (Fonte: NSSDCA)

Parâmetros	Terra	Lua
Massa	$5,9722 \cdot 10^{24}$ kg	$0,0123 \text{ Massa}_{\text{Terra}}$
Raio equatorial	6378,137 km	$0,2724 \text{ Raio}_{\text{Terra}}$
Achatamento	0,0034	0
Semi-eixo maior da órbita	149,6 milhões de quilômetros	384.400 quilômetros
Período orbital	365,256 dias	27,322 dias
Inclinação da órbita	0 graus	5,1 graus
Excentricidade da órbita	0,0167	0,0549
Período de rotação	23,9345 horas	655,7 horas (27,32 dias)

Marte

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

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



Figura 9 – Imagem do planeta Marte, obtida com Hubble Space Telescope. (Fonte: STScI.)

Júpiter

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

Sua atmosfera é também formada por hidrogênio e hélio. Ela é bastante espessa e determina a aparência do planeta. A imagem de Júpiter mostra uma série de bandas coloridas paralelas ao seu equador, que correspondem a nuvens com diferentes movimentos, temperatura e composição química. Uma estrutura bastante inte-

ressante é a chamada *Grande Mancha Vermelha*. Como as bandas, ela também corresponde a um fenômeno meteorológico, por assim dizer. Ela é muito grande (10.000 x 25.000 quilômetros), muito maior que a Terra, por exemplo. É uma estrutura bastante estável, no sentido de que persiste há muito tempo.



Figura 10 – Imagem do planeta Júpiter e seu satélite Io, obtida pelo Hubble Space Telescope. (Fonte: STScI.)

Hoje conhecemos mais de 90 satélites de Júpiter, mas esse número continua a crescer em virtude de novas descobertas. Entretanto, quatro deles destacam-se por seu tamanho: Io, Europa, Ganímedes e Calisto. São chamados satélites galileanos, pois foram descobertos por Galileu, no início do século XVII. Ganímedes é o maior satélite do Sistema Solar. Io e Europa são similares aos planetas telúricos, formados basicamente por rochas. Io possui vulcões ativos e Europa, uma atmosfera de oxigênio, além de um possível oceano de água líquida sob uma crosta de gelo. De todos os satélites do Sistema Solar, ao menos 5 possuem atmosferas: Europa, Io, Ganímedes, Titã (Saturno) e Tritão (Netuno).

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

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

Saturno

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

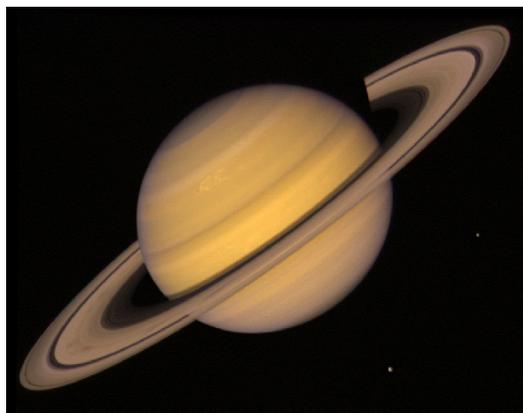


Figura 11 – Imagem do planeta Saturno, obtida pela Voyager 2.
(Fonte: NASA.)

Saturno possui um belo sistema de anéis que é visível através de uma pequena luneta. Dizemos um sistema, pois o disco que vemos em torno de Saturno corresponde a pelo menos sete anéis. Os anéis são compostos por partículas de gelo e poeira, cujos tamanhos vão desde um milésimo de milímetro até dezenas de metros. Apesar de sua grande extensão – o raio externo fica a 480 000 quilômetros do centro de Saturno –, os anéis são extremamente finos, da ordem de

duzentos metros. Para se ter uma ideia dessa proporção, imagine um disco do tamanho de um quarteirão com uma espessura de aproximadamente um centésimo de milímetro! Enquanto os anéis de Saturno são conhecidos há bastante tempo, os anéis dos demais planetas jovianos só foram descobertos na década de 1970.

Saturno possui mais de 80 satélites. Um satélite bastante peculiar é Titã. É o segundo maior satélite do Sistema Solar. Possui um núcleo rochoso, recoberto por um manto de gelo de compostos orgânicos. Sua espessa atmosfera é formada principalmente por nitrogênio e contém também moléculas orgânicas complexas, estrutura que se supõe ser similar à atmosfera terrestre primitiva. A temperatura máxima na superfície de Titã é de -100 graus Celsius.

Urano

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

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

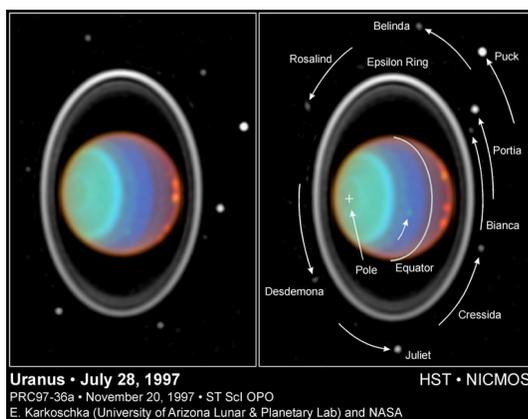


Figura 12 – O planeta Urano com seus discos e satélites. Imagem obtida com Hubble Space Telescope. (Fonte: STScI.)

Esse planeta possui 27 satélites conhecidos (em outubro de 2023), todos compostos principalmente por gelo. Dentre suas maiores luas, a mais próxima de Urano é Miranda. Ela possui um relevo bastante particular, formado por vales e despenhadeiros.

Netuno

Logo após a descoberta de Urano, foi notado que os cálculos matemáticos não reproduziam com exatidão a sua órbita. Foi então sugerido que existiria um outro planeta, cuja influência gravitacional era a responsável pelos desvios de sua órbita. Em 1845, o jovem matemático inglês John C. Adams (1819-1892) e pouco depois o astrônomo francês Urbain Le Verrier (1811-1877) previram a existência de Netuno, que foi identificado observacionalmente pelo astrônomo alemão Johann G. Galle (1812-1910) e H. L. d'Arrest (1822-1875) em 1846. O fato de que Netuno não foi descoberto, mas sim previsto, é considerado uma grande realização da ciência.

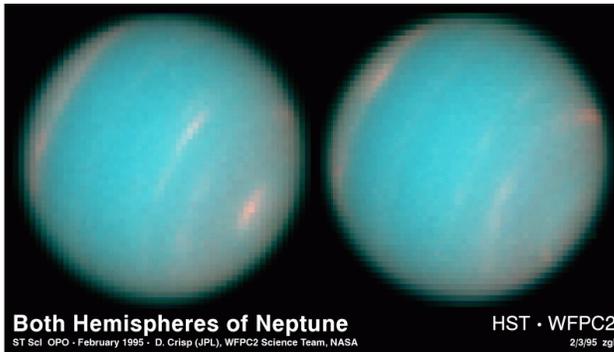


Figura 13 – Imagem dos dois hemisférios do planeta Netuno, obtidas com Hubble Space Telescope (Fonte: STScI.)

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

3.3.3 Planetas anões

Como já citado anteriormente, o Sistema Solar é composto por outros corpos além do Sol e dos planetas e seus satélites. Uma classe recentemente definida de corpos, mas que contém astros conhecidos já há bastante tempo, é a dos planetas-anões.

Desde o final do século XX, a classificação de Plutão como planeta estava sendo discutida. Com a exploração espacial, ficou claro que Plutão era bastante diferente dos demais planetas. Apesar de sua grande distância ao Sol, o que poderia associá-lo aos planetas jovianos, Plutão não era um grande planeta, ao contrário era o menor dos planetas. Só isso já tornava sua classificação entre os plane-

tas telúricos e os jovianos complexa. Sua órbita é muito excêntrica e inclinada com relação à eclíptica, o que o distingue de todos os planetas. Apesar dessas diferenças, ele ainda continuava sendo classificado como planeta. Porém, foram descobertos vários objetos de tamanho similar a Plutão, que também orbitavam o Sol, e com distâncias ao Sol muito próximas das de Plutão. Assim, a região definida pelo entorno da órbita de Plutão contém vários corpos similares a ele. A comunidade de astrônomos definiu, então, que essa característica seria utilizada para diferenciar um planeta de um planeta-anão. Enquanto um planeta está “sozinho” (ou com seus satélites) em sua órbita, os planetas-anões possuem corpos companheiros de órbita que não são os seus satélites. Essa definição foi consolidada em 2006, em uma reunião da União Astronômica Internacional, que é o fórum máximo da astronomia profissional mundial.

Desse modo um planeta-anão é definido como um corpo que orbita em torno do Sol, que é esférico devido a sua própria gravidade, que não possui fusão nuclear interna e cuja órbita esteja localizada em uma região do Sistema Solar que possua outros corpos orbitando em torno do Sol. Plutão não é o único planeta-anão. Outros planetas-anões são Ceres, Éris, Haumea e Makemake. Ceres é o único que se localiza no Cinturão de Asteroides entre Marte e Júpiter, e falaremos mais sobre ele na seção de asteroides. Os demais são localizados além da órbita de Netuno e são chamados de plutoides. A lista de planetas-anões está crescendo constantemente pela descoberta de novos corpos.

Plutão

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

varia entre aproximadamente 30 e 49 Unidades Astronômicas (a distância média entre a Terra e o Sol)

Ele é menor que qualquer dos planetas, com raio de 2.300 quilômetros. Mercúrio, o menor dos planetas, possui raio de 2.440 quilômetros, um pouco maior portanto. Não é o maior dos planetas-anões: Éris possui raio cerca de 35% maior que Plutão. Sua distância e tamanho tornam bastante difícil sua observação, assim algumas das informações que temos sobre esse planeta-anão são ainda incertas. Deve ser composto de rochas (70%) e gelo de compostos orgânicos (30%). Parece apresentar uma pequena atmosfera de Nitrogênio, monóxido de carbono e metano (CH_4).

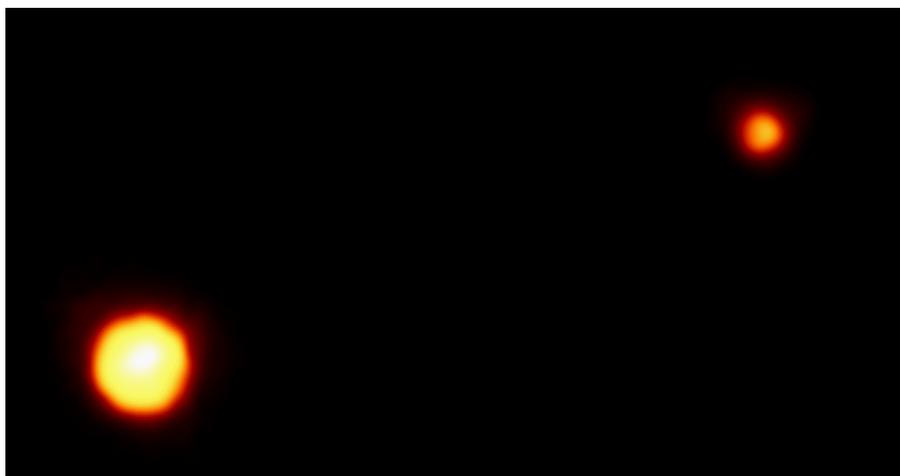


Figura 14 – Imagem de Plutão e seu companheiro Caronte, obtida com Hubble Space Telescope (Fonte: STScI.)

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

Éris

Descoberto já no século XXI, Éris, com diâmetro de 3.100 quilômetros, é maior que Plutão. É, assim, o maior dos planetas-anões. O ano em Éris dura em torno de 560 anos terrestres. Sua órbita, muito excêntrica, coloca-o a distâncias do Sol entre 38 e 98 Unidades Astronômicas.

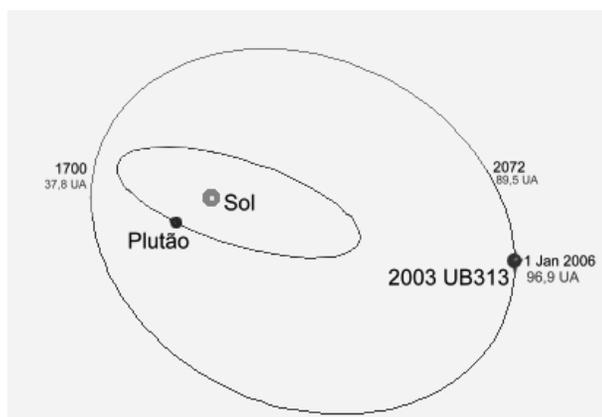


Figura 15 – Órbita de Éris. (Fonte: Wikipedia.)

3.3.4 Corpos menores do Sistema Solar

Existem corpos que orbitam em torno do Sol, mas que não possuem forma esférica. Isso ocorre pois possuem massas pequenas e sua própria gravidade não é grande o suficiente para os tornarem esféricos. Eles são os chamados corpos menores do Sistema Solar. Nessa classe, temos os asteroides, cometas e objetos transnetunianos. Graças ao avanço das técnicas de observação astronômica, tem-se descoberto muitos objetos desse tipo, que são intrinsecamente pouco brilhantes e de difícil detecção. Isso é particularmente válido para os objetos que se encontram muito afastados do Sol (e, portanto, da Terra), em órbitas além da de Netuno. Vamos falar um pouco sobre esses discretos objetos abaixo.

Asteroides

Apesar do nome de origem grega que significa “similar a estrelas”, os asteroides são mais parecidos aos planetas, apesar de muito menores. Existe uma grande concentração de asteroides em um anel entre as órbitas de Marte e Júpiter: o cinturão de asteroides ou cinturão de asteroides principal. Existem asteroides também em outras regiões do Sistema Solar: um exemplo são os asteroides além da órbita de Netuno que compõem, com os plutoides, os objetos transnetunianos. Imagine o que aconteceria se um planeta fosse quebrado em milhares de pedacinhos e esses pedacinhos fossem espalhados ao longo de sua órbita: o cinturão de asteroides é aproximadamente isso. Porém, os asteroides não devem ser o resultado de um processo destrutivo, mas, sim, um planeta que não deu certo. Como veremos mais adiante, os planetas devem ter sido formados aos poucos, a partir da aglutinação de pedaços menores.

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

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

Cometas

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

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

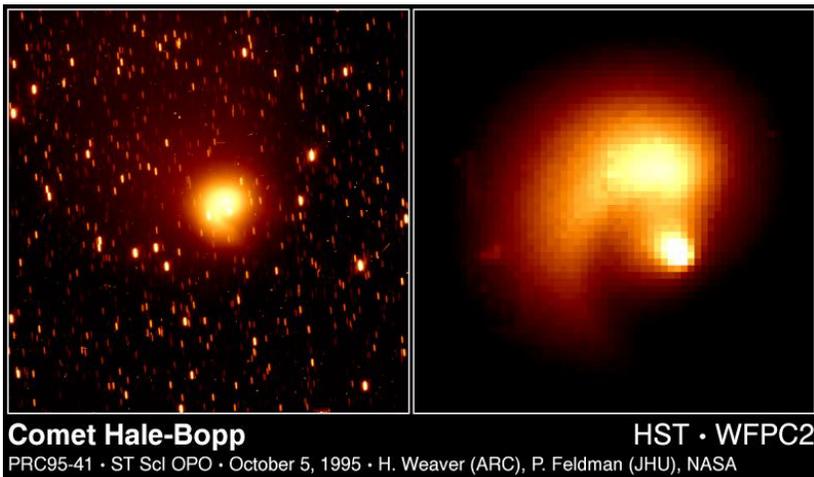


Figura 16 – Imagens do cometa Hale–Bopp, obtida com Hubble Space Telescope (Fonte: STScI.)

Hoje se acredita que os cometas são resquícios da época da formação do Sistema Solar. Sua composição deve ser a mesma da nuvem primordial que deu origem ao Sol e aos planetas (veja a Seção 3.5). Mas, de onde vêm os cometas? Provavelmente de uma região bastante afastada do Sistema Solar chamada Nuvem de Oort, idealizada pelo holandês Jan H. Oort. Supõe-se que ela seja uma nuvem de gás, poeira e cometas que circunda todo o Sistema Solar, formando uma casca esférica. Os cometas concentram-se nessa região e ocasionalmente são perturbados, modificando sua órbita para uma muito excêntrica de modo que no periélio passam muito próximos ao Sol: nessa situação eles se tornam visíveis (Figura 3.17).

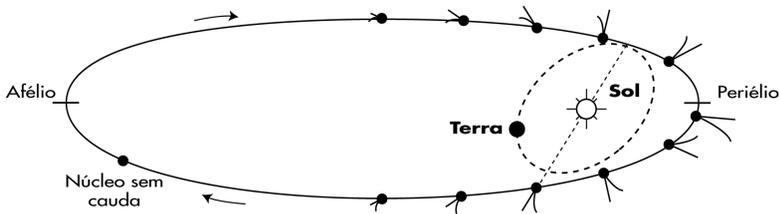


Figura 17 – Uma ilustração de órbita de cometa.
(Fonte: Elaboração da autora.)

3.3.5 Meteoros, Meteoritos e Meteoroides

Um fenômeno bastante conhecido e relacionado aos corpos menores do Sistema Solar é a “estrela cadente”. Esse fenômeno não é de modo algum relacionado a queda de uma estrela. Os riscos luminosos que por vezes vemos no céu originam-se da entrada na atmosfera de restos de cometas ou asteroides que vagam pelo Sistema Solar. Esses corpos são os chamados meteoroides. Os menores são desintegrados pelo atrito com a atmosfera e apenas os maiores podem chegar à superfície da Terra, quando são denominados meteoritos. Esses meteoritos são, em sua maior parte, originários de asteroides, pois os restos de cometas são muito tênues e tendem a se desintegrar ao entrar na atmosfera. Esses corpos entram em nossa

atmosfera com uma alta velocidade relativa e o atrito produz luz, que é o que chamamos de meteoro.

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

Por que algumas chuvas de meteoros se repetem na mesma época do ano? Os cometas podem deixar atrás de si rastros de poeira que formam “tubos” com diâmetros da ordem de 10 a 50 milhões de km!! Quando a Terra atravessa um desses tubos de poeira, ocorre a chamada chuva de meteoros. É por isso que existem determinadas épocas do ano para que isso ocorra: é quando a Terra atravessa o rastro de um cometa importante.

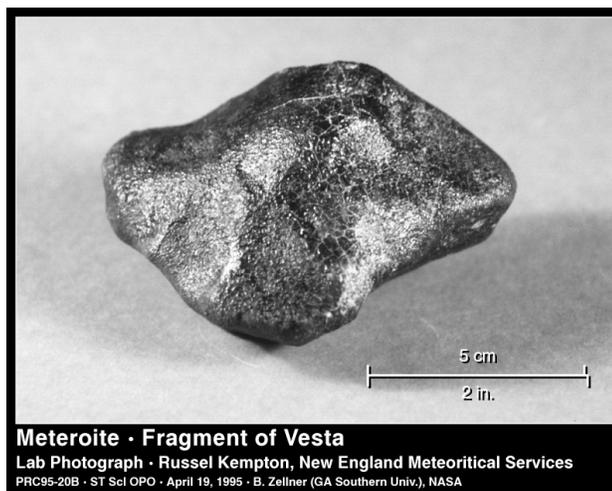


Figura 18 – Meteorito de um fragmento do asteroide Vesta. (Fonte: NASA.)

Hoje a teoria mais aceita para a extinção dos dinossauros é a de um impacto de um meteorito ocorrido no México, próximo à Península de Yucatan, por volta de 65 milhões de anos atrás. Segundo pesquisas recentes, esse meteorito teria um diâmetro de cerca de

10 km. A cratera formada teria entre 200 e 250 quilômetros de diâmetro, e é denominada Cratera de Chicxulub. O choque teria jogado para a atmosfera uma enorme quantidade de poeira, que teria bloqueado os raios solares e levado ao resfriamento drástico da superfície terrestre por vários meses. Isso teria provocado a morte das plantas e, como consequência, a dos animais que delas se alimentavam. A energia estimada para esse impacto corresponde a cinco bilhões de bombas nucleares como a que foi lançada em Hiroshima.

3.4 A formação do Sistema Solar

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

A galáxia em que vivemos chama-se Via Láctea. As estrelas que formam a Via Láctea formam a faixa esbranquiçada, de aparência leitosa, que pode ser vista em noites escuras de inverno. Nós temos essa perspectiva pois estamos dentro da Via Láctea que possui forma similar a um disco. O Sol é apenas uma das bilhões de estrelas que existem na Via Láctea. Mesmo o planeta mais distante do Sistema Solar (Netuno) encontra-se muito mais perto que a estrela mais próxima. Netuno encontra-se a poucas horas-luz, enquanto a estrela mais próxima está a mais de 4 anos-luz.

Em galáxias do tipo da nossa Via Láctea, que é uma galáxia espiral, existem nuvens de matéria na região equatorial. Essas nuvens não são como as da nossa atmosfera, que são basicamente compostas por água, mas aglomerados de gás e poeira. As estrelas, de modo geral, e o nosso Sistema Solar, em particular, tiveram sua origem em uma nuvem desse tipo. Isto é, o Sol nasceu e foi formado em uma dessas nuvens.

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

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

Assim, o Sistema Solar em seu início, há cerca de 4,6 bilhões de anos atrás, era muito diferente do que é hoje. Inicialmente, o Sol não era uma estrela exatamente como é hoje, com fusão de energia em seu interior. Os planetas também não existiam. Existia apenas uma concentração de massa central e um disco de matéria em torno dela. Enquanto a concentração de massa central evoluía para o que é o nosso Sol atualmente, um disco externo estruturava-se em anéis. Eles iriam transformar-se nos planetas. Um dos anéis não deu origem a um planeta, mas continua até hoje como um anel. É o cinturão de asteroides, entre as órbitas de Marte e Júpiter, sobre o qual já falamos em uma seção anterior.

Como um anel de matéria em torno do Sol transforma-se em planeta? O gás e poeira presente nesses anéis colidem e formam pequenos aglomerados de matéria, chamados planetesimais. Esses planetesimais, por sua vez, também podem colidir e na colisão pode ocorrer liberação de calor. Esse calor pode “derreter” a matéria des-

ses planetesimais que se amalgamam e se fundem no resfriamento, formando um corpo único.

De modo geral na formação de estrelas como o Sol, do colapso inicial da nuvem até o início da condensação dos planetas o intervalo de tempo deve ser da ordem de 10 milhões de anos. Até que a concentração central se torne uma estrela transcorrem-se 50 milhões de anos. Para chegar ao estágio final de um sistema planetário deve transcorrer 1 bilhão de anos.

Toda a teoria exposta acima está de acordo com as características gerais do Sistema Solar. Algumas delas são: (1) os planetas encontram-se aproximadamente em um mesmo plano que é o plano equatorial do Sol; (2) as órbitas são quase circulares; (3) grande parte das rotações ocorre no mesmo plano e sentido.

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

É interessante notar que muito do que sabemos sobre a formação do Sistema Solar é corroborado pelo que observamos no Universo. Existem regiões onde ocorre atualmente a formação de estrelas, exatamente como aconteceu em nosso Sistema Solar. Faça uma analogia com os seres humanos. Em uma festa, um dos convivas é um jovem de 20 anos. Porém entre todos os convidados você pode encontrar bebês, crianças, adolescentes, adultos e idosos, todos ao

mesmo tempo. E cada um deles representa uma fase passada ou futura daquele jovem de 20 anos. Assim, entendendo as pessoas dessa festa, você pode ter uma ideia da evolução de um ser humano do nascimento à morte. Assim, também ocorre com as estrelas. Em um capítulo específico, a formação estelar é apresentada com mais detalhes.

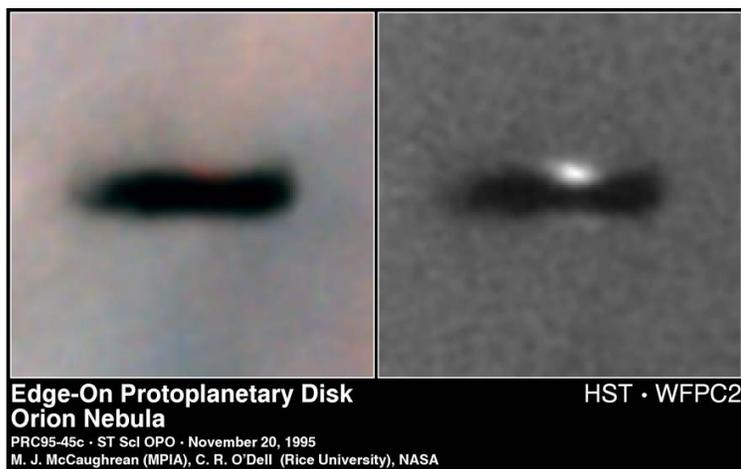


Figura 19 – Um disco planetário observado na região de Órion pelo Hubble Space Telescope (Fonte: STScI.)

3.5 Existem outros sistemas planetários no universo?

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

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

Referências

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

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

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

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

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

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

Oliveira Filho, K. S; Saraiva, M. F. O. *Fundamentos de astronomia e astrofísica*. Porto Alegre: Depto. de Astronomia do Instituto de Física – UFRGS, 1999. Disponível em: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>. Acesso em 27 de outubro de 2023.



4. Habitabilidade Cósmica e a Possibilidade de Existência de Vida em Outros Locais do Universo

Frederico Vieira, Dinelsa Machaieie, Karin Fornazier, Lia Corazza, Manoel Castro, José William Vilas-Bôas, José Roberto Cecatto, Carlos Alexandre Wuensche

4.1 Introdução

A existência de vida no Universo tem permeado o pensamento humano desde os primórdios da civilização. Os avanços científicos do século XX, particularmente a partir da década de 1950, com a exploração do espaço exterior, permitiram um estudo mais aprofundado sobre uma série de fenômenos astronômicos que ampliaram, em muito, a compreensão do Universo. O cenário construído a partir dessas observações, em paralelo com avanços teóricos e modelos computacionais, indica que vivemos num Universo com cerca de 14 bilhões de anos, cuja composição inclui $\sim 96\%$ de matéria e energia

escuras, de origem ainda desconhecida, e $\sim 4\%$ de matéria ordinária (basicamente constituída de prótons, nêutrons e elétrons) que deu origem às estrelas e galáxias, observadas principalmente através da emissão de radiação eletromagnética. Uma cronologia da evolução do modelo padrão, bem como uma descrição atualizada e didática do “status” da cosmologia atual pode ser encontrada em Smoot *et al.* (1992), Bennett *et al.* (1994), Bennett *et al.* (2003), Bennett *et al.* (2013), Ade *et al.* (2016), Patrignani *et al.* (2016), Aghanim *et al.* (2020).

Esse cenário é o chamado “Modelo Cosmológico Padrão” (doravante MCP), ou “Big Bang”, que prevê que a formação das primeiras estrelas ocorreu quando o Universo tinha algumas dezenas de milhões de anos. Estudos recentes sugerem, inclusive, que as condições para formação das primeiras populações de estrelas começaram por volta dos 30 milhões de anos do Universo (Loeb (2014), Loeb (2016), Naoz *et al.* (2006)), quando o Universo primordial era composto, essencialmente, de Hidrogênio atômico (H) e Hélio (He). Elementos químicos mais pesados foram produzidos durante o ciclo de reações nucleares das primeiras gerações de estrelas, com massas de dezenas a centenas de vezes a massa do Sol.

A perda de massa por ventos estelares e explosões de supernovas (Nomoto *et al.* (2013), Maio *et al.* (2015), Kulkarni *et al.* (2014)) foram os principais responsáveis pelo enriquecimento do meio interestelar e fizeram com que as gerações de estrelas formadas posteriormente fossem produzidas em ambientes cuja composição química foi gradualmente enriquecida por elementos mais pesados do que o He. A consequência natural deste processo foi a síntese de moléculas cada vez mais complexas, em nuvens de gás e poeira cósmica (doravante “nuvens GP”), através de processos químicos na fase gasosa ou reações na superfície dos grãos de poeira (Tielens (2005), Herbst e Van Dishoek (2009), Garrod (2013)).

As nuvens GP são regiões adequadas para a observação de moléculas de interesse bioquímico contendo, entre outras, moléculas de

metanol (CH_3OH), formaldeído (H_2CO) e ácido fórmico (HCOOH) (Caselli e Ceccarelli (2012), Ehrenfreund e Chanrley (2000), Van Dishoeck e Blake (1998)). Estas nuvens são também “berçários estelares”. Seu interior frio favorece o colapso gravitacional de regiões que se fragmentam e podem formar estrelas. No caso de estrelas com massas menores que $\sim 1 - 1,5 M_{\text{Sol}}^1$, o colapso gravitacional dá origem a discos proto-planetários e a todos os objetos que compõem este sistema. O cenário acima permite descrever a formação do Sistema Solar, explicando a origem dos planetas rochosos e das condições físico-químicas necessárias para o surgimento da “vida como a conhecemos” (ver, e.g., Taylor (2005), Youdin *et al.* (2013), Williams e Cieza (2011)).

A evolução de sistemas químicos complexos é baseada nas propriedades de átomos e moléculas, bem como nas leis da termodinâmica (e.g., Olomucki (1993)). Ao estudar a origem da vida, porém, é necessário lidar com o paradoxo decorrente do fato de sistemas vivos serem compostos de estruturas químicas, inanimadas, extremamente organizadas. Uma forma coerente de tentar explicar o surgimento dos sistemas vivos é, partindo do “Big Bang”, analisar a dinâmica e a evolução química do Universo com base no ciclo de formação e evolução estelar, que inclui o conhecimento das reações nucleares que produzem elementos mais pesados do que o He. O passo seguinte é explorar a relação entre essa evolução e a química que possibilitou a formação de sistemas planetários e organismos vivos. Essa abordagem é uma das linhas de ação da Astrobiologia, disciplina que estuda a origem, evolução, distribuição e destino da vida no Universo (Cottin *et al.* (2015), Santos *et al.* (2016), Horneck *et al.* (2016)).

Este capítulo discute o que é considerado o cenário mais aceito da evolução química do Universo e sua relação com a origem dos sistemas vivos como os conhecemos, sob a ótica da Astrobiologia.

Os artigos em português listados a seguir são boas referências para uma abordagem mais formal ao tema: (Damineli (2010), Quill-

¹ M_{Sol} equivale à massa do Sol, cerca de 2×10^{30} kg.

feldt (2010), Paulino-Lima e Lage (2010), Pacheco (2014) e textos completos ((Zubay (2000), Lunine (2004), Shaw (2006), Horneck (2007), Cockell (2015), Longstaff (2015), Galante (2016)).

Este capítulo está dividido em 6 seções. Após esta introdução, a seção 2 apresenta o modelo cosmológico padrão e o processo de formação das primeiras estruturas, levando ao aparecimento das primeiras estrelas, conhecidas como estrelas de população III ou, simplesmente, “Pop III”. O papel do meio interestelar e das nuvens cósmicas de gás e poeira na formação de moléculas complexas e sistemas protoplanetários é discutido na seção 3. A seção 4 trata das chamadas zonas habitáveis e discute o conceito de habitabilidade. O conceito de vida e a evolução química necessária ao surgimento da mesma são abordados na seção 5 enquanto as considerações finais são apresentadas na seção 6.

4.2 Condições cosmológicas e astrofísicas para o surgimento de sistemas vivos

O Modelo Cosmológico Padrão (MCP) pode ser descrito pelos parâmetros cosmológicos primários: as densidades de matéria escura fria Ω_{CDM} e de matéria bariônica Ω_b ; a densidade de energia escura Ω_Λ ; a constante de Hubble H_0 ; a amplitude das flutuações de matéria, responsável pela formação das estruturas cósmicas σ_8 e a profundidade óptica τ na época da formação dos átomos de H e He neutros. Uma descrição atualizada dos parâmetros cosmológicos pode ser encontrada, por exemplo, em Patrigniani *et al.* (2016), Calabrese *et al.* (2017)) e Aghanin *et al.* (2020)

As medidas desses parâmetros vêm sendo feitas desde a década de 1990 e foram bastante refinadas com os resultados das observações dos satélites WMAP (Bennett *et al.* (2013), Planck (Ade *et al.* (2018), Aghanim *et al.* (2020)) e dos experimentos Atacama Cosmology Telescope – ACT (Dunkley *et al.* (2013), Hlozek *et al.* (2012), Sievers *et al.* (2013), Lindner *et al.* (2015)) e South Pole Telescope – SPT

(Reichardt *et al.* (2012), Shirokoff *et al.* (2011), Story *et al.* (2013)). Elas são complementadas pelas observações das estruturas em grande escala no Universo, constituídas por aglomerados e superaglomerados de galáxias, cujas referências bibliográficas recomendadas podem ser encontradas, por exemplo, nos sites dos levantamentos “Sloan Digital Sky Survey” (SDSS 2017), “APM Survey” (Maddox *et al.* (1990)), “2dF Survey” (2dF 2017) e “6dF Survey” (6dF 2017).

O quadro geral que emerge do MCP, também chamado de modelo Λ CDM é de um Universo com cerca de 14 bilhões de anos, constituído de $\sim 69\%$ de energia escura, $\sim 27\%$ de matéria escura e $\sim 4\%$ de matéria bariônica, em expansão acelerada. Sua evolução é adequadamente descrita pela Teoria Geral da Relatividade e governada pela contribuição das componentes do tensor matéria-energia, que interagem através da força gravitacional. As grandes estruturas hoje observadas foram formadas hierarquicamente, com estrelas interagindo gravitacionalmente para formar aglomerados estelares, em seguida galáxias e posteriormente, aglomerados de galáxias e estruturas ainda maiores.

De acordo com o modelo Λ CDM, estima-se que, no intervalo de tempo entre 1– 1000 s (~ 20 minutos) após o Big Bang, a partir dos prótons e nêutrons livres, ocorreu a formação de ^3He , ^4He , Deutério (D) e Lítio (Li). A contribuição dos dois últimos para a *nucleossíntese primordial* é da ordem de $\sim 10^{-5}$ e $\sim 10^{-9}$ vezes a abundância do hidrogênio. Devido à expansão e resfriamento do Universo, não foi possível produzir nenhum outro elemento mais pesado durante essa fase.

As primeiras estruturas gravitacionalmente ligadas no Universo, constituídas inicialmente de grandes nuvens de H e He, condensaram-se a partir do gás primordial, alguns milhões de anos após a recombinação. A formação das estrelas Pop III, com massas muito altas (até $\sim 200 - 500 M_{\text{Sol}}$ e tempo de vida menor do que 100.000 anos na Sequência Principal) ocorreu durante as primeiras dezenas de milhões de anos após o Big Bang iniciando a produção

dos elementos mais pesados que a série Li, Be, B, chamados genericamente, no jargão astrofísico, de “metais”.

Assim, em algumas dezenas de milhões de anos as explosões de gerações sucessivas de estrelas dispersaram elementos químicos mais pesados que Li, Be, B, enriquecendo quimicamente o meio interestelar e, conseqüentemente, as novas gerações de estrelas (Tielens (2013)). Alguns autores (Naoz *et al.* (2006), Loeb e Furlanetto (2013), Loeb (2014), Loeb (2016) têm uma abordagem mais radical, sugerindo, a partir de estudos teórico-computacionais, que as condições que desencadearam a formação das primeiras estrelas surgiram quando o Universo tinha cerca de 30 milhões de anos. Isso significa que as condições para produção de elementos de importância prebiótica poderia ser antecipada em, pelo menos, 70 milhões de anos.

O ciclo evolutivo das estrelas é diretamente dependente de sua massa, sendo que estrelas com massa $M < 1,4 M_{Sol}$ vivem da ordem de alguns bilhões a alguns trilhões de anos. O intervalo de massas das chamadas estrelas de baixa massa vai de $0,08 M_{Sol}$, que é o limite de massa que permite o início do ciclo de reações de fusão de H, até cerca de $\sim 2 M_{Sol}$. Os objetos com massas menores que $0,08 M_{Sol}$ são conhecidos como *anãs marrons*. As estrelas de massa intermediária ($2 < M/M_{Sol} < 8$) produzem núcleos degenerados de C, não sendo capazes de processá-lo para formar elementos mais pesados. Somente *estrelas massivas*, com massas maiores que $\sim 8 M_{Sol}$, produzem os elementos químicos mais pesados que o Carbono (C) em grande quantidade, sendo os principais C, Nitrogênio (N), Oxigênio (O), Fósforo (P) e Enxofre (S). Ao final do ciclo de reações nucleares, elas explodem como supernovas e, neste processo, produzem desde o Ferro (Fe), último elemento do ciclo de fusão nuclear, até o Urânio (U), o último elemento da tabela periódica produzido de forma natural.

A química e o metabolismo da vida, como a conhecemos, são compostos, principalmente, pelos elementos químicos C, N, O, P e S, conhecidos sob a sigla de **CHONPS**. Obviamente há outros ele-

mentos importantes para o metabolismo dos seres vivos, porém os **CHONPS** estão presentes em praticamente todas as formas de vida conhecidas, tornando-os um denominador comum. A proporção desses elementos, tanto no Sol quanto em sistemas vivos é mostrada na figura 1. Os elementos **CHON** circundados por círculos vermelhos, correspondem a cerca de 96% do peso corporal de um ser vivo e aproximadamente 72% da massa do Sol.

Essencialmente, todos os elementos químicos do C ao Fe foram produzidos por fusão nuclear ou outros processos no interior de estrelas em algum momento da evolução do Universo. Sem metais, teríamos apenas moléculas formadas por H e He, estáveis somente em condições de baixíssima temperatura, como por exemplo HeH^+ e, muito provavelmente, não haveria formação de planetas ou de vida como a conhecemos (ver, e.g., Wilson, no Handbook of Molecular Physics (2003)).

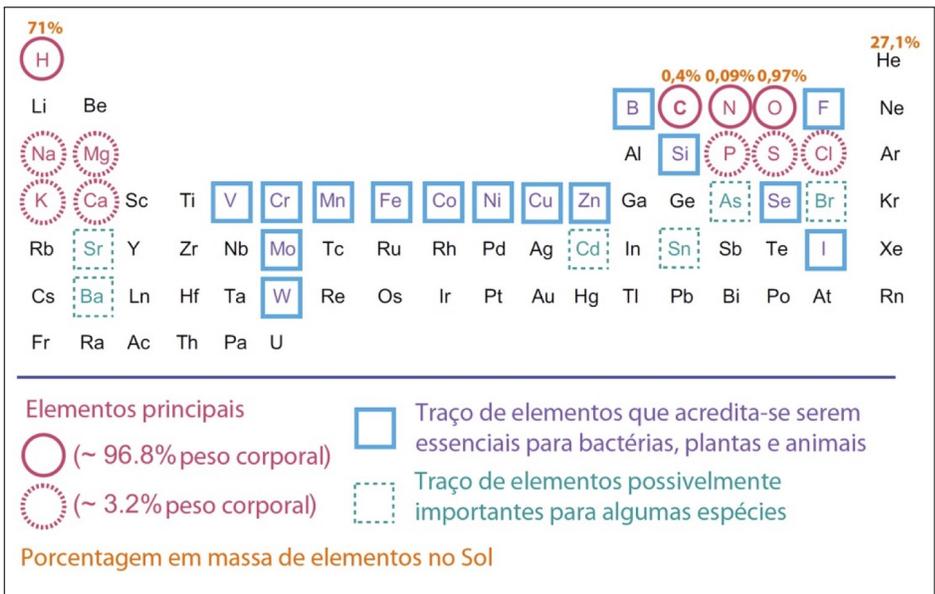


Figura 20 – Tabela periódica demonstrando abundâncias de elementos químicos em porcentagem de peso corporal de organismos vivos terrestres e os elementos indispensáveis ao crescimento e sobrevivência do organismo, chamados de elementos essenciais. (Fonte: Adaptado de Chopra (2009)).

4.3 A evolução química do universo

O processo de formação de moléculas no espaço é afetado por vários fatores, tais como as condições físico-químicas do ambiente, o estado dos “reagentes” e as fontes de energia envolvidas. Conhecer as características e propriedades do chamado Meio Interestelar (MI) é essencial para uma melhor compreensão dos processos de evolução e enriquecimento químico em ambientes astrofísicos.

4.3.1 Características do meio interestelar

O MI é constituído de gás, poeira, campo de radiação (radiação eletromagnética de estrelas, galáxias e outros corpos celestes bem como fótons da Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas), raios cósmicos (constituídos de partículas elementares e núcleos atômicos) e campo magnético. O gás é a componente dominante, misturado com a poeira, na proporção de 100 para 1 em massa, e pode ser encontrado no estado neutro (na forma de átomos ou moléculas) e/ou ionizado.

As condições físico-químicas do MI, também chamadas fases, são bastante heterogêneas, com a temperatura e densidade do gás variando de ~ 10 a $\sim 10^6$ K e de $\sim 10^{-4}$ a mais de 10^8 cm^{-3} , respectivamente. Regiões de gás e poeira com temperaturas ~ 10 K e densidades maiores que 10^3 cm^{-3} , comumente chamadas de nuvens moleculares, são ambientes apropriados para a formação de moléculas e poeira com mantos de gelos (ver, e.g., Caselli e Ciccarelli (2012)). Um resumo das características das diferentes fases do MI encontra-se na Tabela 1 e uma descrição bastante detalhada de suas propriedades e processos físicos foi feita por A. Tielens (2005).

Tabela 1 – Síntese das propriedades das fases do MI.
(Fonte: Elaboração dos autores).

Fase	Dimensões típicas (pc)	n_0^b (cm^{-3})	T^c (K)	Estado do gás (H)
Nuvens moleculares	80	> 200	10	molecular
Meio frio neutro	100 – 300	50	80	neutro (atômico)
Meio morno neutro (atômico)	300 – 400	0,5	8000	neutro (atômico)
Meio morno ionizado	1000	0,1	8000	ionizado
Regiões HII	70	$10^2 - 10^4$	10^4	ionizado

^a - 1 pc = $3,086 \times 10^{18}$ cm.

^b - Densidade típica do gás para cada fase.

^c - Temperatura típica do gás para cada fase.

4.3.2 Formação de compostos simples

O reprocessamento de elementos químicos em nuvens moleculares (NM), durante os inúmeros ciclos de evolução estelar, é um requisito essencial para a formação de moléculas prebióticas, que são os principais constituintes dos organismos vivos. A síntese de moléculas nas NM ocorre por reações químicas na fase gasosa ou nos mantos que se acumulam sobre a superfície dos grãos de poeira cósmica². Embora os grãos de poeira constituam apenas 1% da massa do MI, eles são bastante importantes porque propiciam a associação dos átomos de H, na sua superfície, para formar o H₂, que é o principal constituinte das NM.

Além disso, a poeira e o H₂ bloqueiam a radiação ultravioleta e visível, protegendo dessa forma, as moléculas das regiões mais internas das nuvens de serem dissociadas (ver, e.g., Hollenbach (1971), Caselli e Ciccarlli (2012)). Também favorecem a hidrogenação de algumas moléculas e a ocorrência de reações químicas que levam à formação de substâncias cada vez mais complexas, como os aminoácidos, importantes para o desenvolvimento da vida. Um con-

²Os grãos de poeira são partículas com tamanhos da ordem de 0.1 microns, compostas por silicatos e carbonatos (moléculas formadas por Silício e Carbono ligadas ao Oxigênio).

junto representativo das reações que ocorrem no MI é apresentado na figura 2.

Moléculas contendo C são importantes nessa discussão uma vez que o carbono é essencial para a existência da vida, e o elemento estruturante da química orgânica. Essa importância decorre das seguintes propriedades do C: ele é o quarto elemento mais abundante no Universo; é extremamente versátil quimicamente (comparado, p.ex., com o Silício, Si; possui a capacidade de realizar ligações covalentes com elementos com valência um, dois, três ou quatro; não é dissolvido ou reage com ácidos ou água; é capaz de formar cadeias muito longas (nenhum outro elemento é capaz de formar tantas ligações tão fortes), além de permitir uma grande variedade de combinações de cadeias carbônicas, o que o torna o componente primário das macromoléculas.

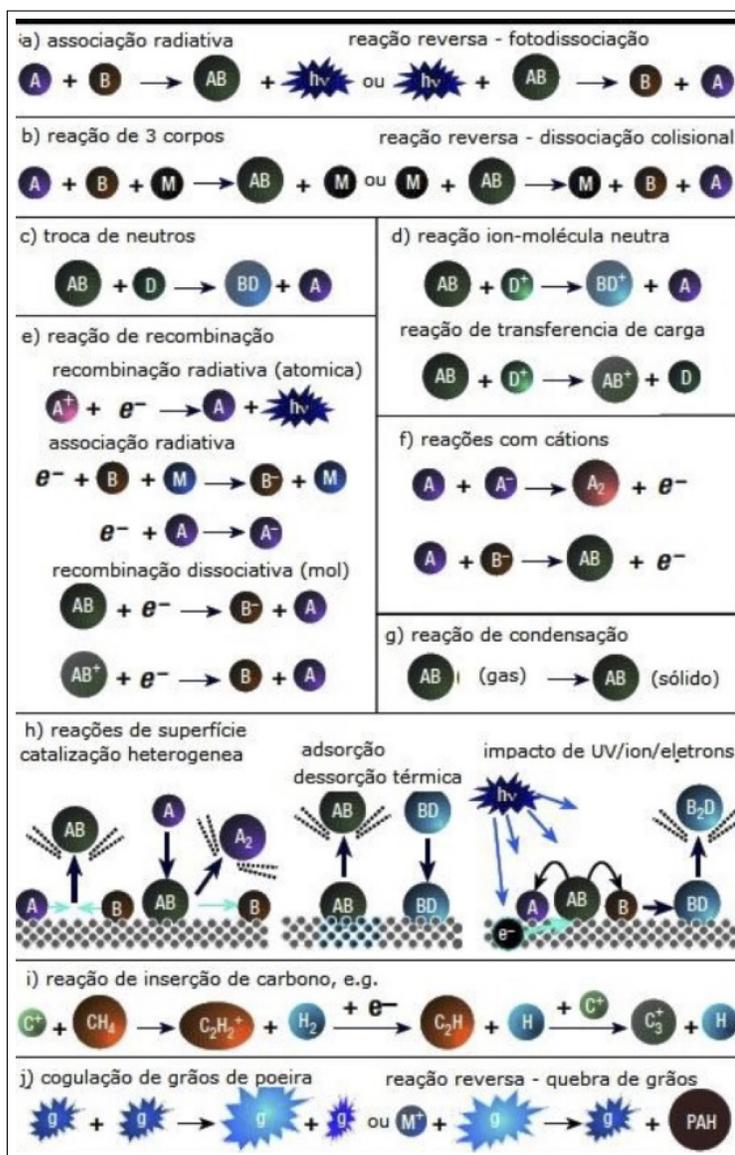


Figura 2 – Representação esquemática das principais reações químicas que ocorrem nas nuvens interestelares. O símbolo PAH corresponde a Hidrocarbonetos Poli Aromáticos (Fonte: Adaptado de Fraser (2002)).

4.3.3 Moléculas no meio interestelar e discos protoplanetários

A primeira linha espectral de uma substância química observada no MI data de 1904 (Pagni (2007)) com a detecção no visível do íon de Ca^+ no sistema f-Orionis. As primeiras observações das moléculas CN, CH e CH^+ foram feitas por volta de 1940 e, em 1951, foi detectado H neutro através de uma linha de comprimento de onda de 21 cm (Ewen e Purcell (1951), Hulst (1951)), no espectro de rádio. Na década de 60 foram observadas no MI linhas espectrais das moléculas de água e amônia (Cheung *et al.* (1968), Cheung *et al.* (1969)). No entanto, foi a observação de uma linha espectral em 115 GHz da molécula de CO (Wilson *et al.* (1970)) que impulsionou o estudo sobre a possibilidade de formação de moléculas orgânicas no MI. Desde então, as observações têm mostrado a presença de quase todos os tipos de representantes das famílias da química orgânica: hidrocarbonetos, álcoois, ácidos, aldeídos, acetaldeídos, cetonas, aminas, éteres e açúcares (Pagni (2007), Kowk (2009), Kwok (2011), Herbst e van Dishoek (2009)). Uma cronologia das observações de moléculas no MI pode ser encontrada em http://www.astrochymist.org/astrochymist_ism.htm.

Até recentemente, quase 200 moléculas foram observadas no MI ou em envoltórios circunstelares, sendo boa parte delas orgânica (contém pelo menos um $-\text{CH}$). A maior parte delas foi detectada em nuvens moleculares, onde a presença de gás denso e grãos de poeira impede a penetração da radiação UV que tende a dissociá-las (Caselli e Ciccarelli (2012)). Uma lista das moléculas já observadas no espaço, com as respectivas referências, pode ser encontrada no site <https://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules>.

O colapso de regiões em uma nuvem molecular leva, frequentemente, à formação de glóbulos e discos, dando posteriormente origem a sistemas protoestelares. Estes sistemas, constituídos de disco protoplanetário e protoestrela contém, além da composição química original, novas moléculas formadas durante o colapso. Excelentes discussões sobre a evolução química das nuvens interesse-

lares e sua contribuição para a formação de discos protoplanetários podem ser encontradas nos artigos de van Dishoek (2004) e Henning e Semenov (2013).

Os estágios primordiais de formação de um sistema protoplanetário são representados na figura 3, com o lado direito contendo as indicações da distribuição de temperatura dentro do disco, locais de formação de moléculas complexas, bem como as regiões onde se encontram íons e radicais, em função da distância à protoestrela central. No lado esquerdo são indicadas as regiões de formação dos planetas gigantes, a região de transporte turbulento de matéria para o centro do disco e a região de deposição das partículas de poeira e mantos de gelos. A linha azul, denominada linha de gelo, corresponde à posição em que as moléculas de água e amônia formam gelos na superfície dos grãos de poeira cósmica.

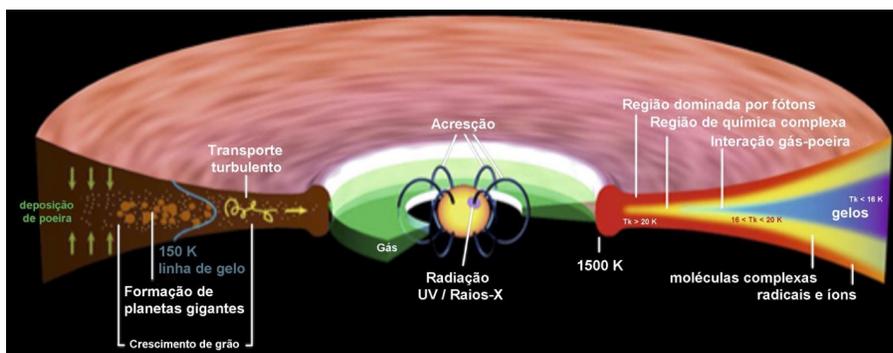


Figura 3 – Esquema da estrutura física e química de um disco protoplanetário, em estágio avançado de evolução, em torno de uma estrela de baixa massa. Fonte: Adaptado de Henning e Semenov (2013).

A análise do gás e poeira ejetados de cometas mostram que 30% dos grãos de poeira contidos nesses corpos celestes são dominados pelos elementos CHONPS. Muitas espécies químicas de importância prebiótica foram detectadas em cometas. Como exemplo, no cometa *Hyakutake*, foram observadas amônia (NH_3), metano (CH_4), acetileno (C_2H_2), acetonitrila (CH_3CN) e isocianeto de hidrogênio (HNC). No cometa *Hale—Bopp* também foram observadas moléculas

las de CH_4 , C_2H_2 , ácido fórmico (HCOOH), HCN , HNC , ácido cianico (HNCO), cianoacetileno (HC_3N) e tioformaldeído (H_2CS) (Palmer et al. (1996), Dello Russo et al. J. Geophys. Res., 107(E11) (2002).).

A presença dessas moléculas em cometas formados no disco protoplanetário sugere que estes podem ter sido uma importante fonte de moléculas orgânicas, incluindo aminoácidos, para a Terra primitiva (Brack (2007)). Reações químicas na superfície de grãos de poeira cósmica e suas interações com a fase gasosa têm sido estudadas através de simulações numéricas considerando centenas de reações químicas. Uma descrição detalhada do processo de simulação das reações pode ser encontrada em Aikawa *et al.* (2005), Garrod (2013). Os resultados de Garrod mostram que mantos de gelo na superfície dos grãos, sob a ação de raios cósmicos, podem ser um ambiente propício para a formação de moléculas de importância prebiótica.

A figura 4 mostra a evolução temporal da fração de abundância de espécies químicas selecionadas, produzidas em um modelo de nuvem interestelar em colapso, para formar um sistema protoplanetário, constituído de estrela central e disco em torno da estrela. Nesse modelo, por conta do colapso, a temperatura da nuvem varia gradativamente de 20 K a 400 K, numa escala de tempo de um milhão de anos. Os gelos mais abundantes nesse ambiente são formados de água (H_2O), seguido de monóxido de carbono (CO), amônia (NH_3) e metano (CH_4). Somente a partir de 100 K é que a abundância dessas espécies no estado gasoso é maior do que no estado sólido.

Há evidências que a glicina, um dos vinte aminoácidos ligados à vida, é produzido na superfície dos grãos sob a forma de gelo quando a temperatura do meio é de 30 a 200 K (ver, e.g., Garrod (2013b))

Acima dessa temperatura ela passa ao estado gasoso. Várias outras moléculas de importância prebiótica são produzidas nas nuvens de gás e poeira cósmica da mesma maneira e, de acordo com esses resultados, espera-se que as reações na superfície dos grãos definam a abundância de glicina nas nuvens cósmicas.

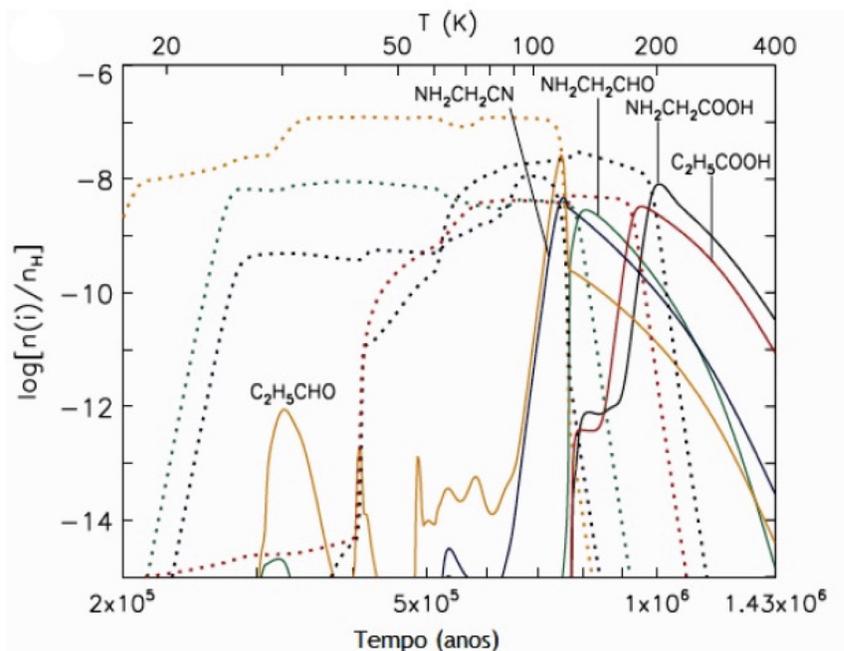


Figura 4 – Fração de abundância do aminoácido glicina e de várias outras espécies similares ou parentes em função do tempo. A linha sólida indica espécies na fase gasosa e as linhas pontilhadas da mesma cor indicam mantos de gelo da mesma espécie. (Fonte: Adaptado de Garrod (2013b)).

A dinâmica peculiar a cada sistema e a ocorrência de processos aleatórios devem ter sido responsáveis pelas diferenças entre os sistemas planetários distintos. Acredita-se que a evolução desse sistema dinâmico caótico levou à formação da primeira forma de vida na Terra e foi capaz de mantê-la durante bilhões de anos e possibilitar sua evolução.

4.4 Zona habitável e habitabilidade

A definição de Zona Habitável (ZH) foi introduzida em 1959 (Huang (1959)) como sendo a região ao redor de uma estrela em que o ciclo de fusão de H em He seja estável por alguns bilhões de anos, permitindo que um planeta possa manter água, no estado líquido, em

sua superfície. A estrela fornece a energia e a água funciona como um solvente eficiente que participa ativamente das reações químicas.

Posteriormente foi introduzida a ideia de uma Zona Habitável Galáctica, definida como a região mais provável da vida emergir em uma galáxia (ver, e.g., Lineweaver *et al.* (2004), Ward e Brownlee (2000), Gonzalez *et al.* (2001)). Nessa região o enriquecimento químico contém abundância adequada de **CHONPS** e a quantidade de eventos catastróficos capazes de interromper o processo de formação de vida (ou sua sobrevivência) é baixa comparada com a escala de tempo evolutivo terrestre. Lineweaver e colaboradores (2004) modelaram a evolução da nossa Galáxia e identificaram como a ZHG uma região entre 7 e 9 kiloparsecs distante do centro, cujo raio varia com o tempo, composta por estrelas formadas entre 4 e 8 bilhões de anos atrás. Eles estimaram que cerca de 75% das estrelas nessa ZHG são mais velhas do que o Sol, aumentando a probabilidade de existência de vida nessa região. Nela também há baixa ocorrência de supernovas e a idade das estrelas seria suficiente para produzir o enriquecimento químico necessário à formação de planetas terrestres e à possível evolução biológica. O conceito de ZH e sua relação com a química da vida pode ser flexibilizado de forma a incluir outros solventes e, hipoteticamente, outros elementos-base para formar uma bioquímica alternativa.

Embora essa flexibilidade saia da abordagem padrão, é interessante explorar algumas possibilidades com a matéria prima disponível no Universo. Por exemplo, W. Bains (Bains (2004)) argumenta que outros fluidos podem ser abundantes em diferentes locais do Universo e a natureza química desses fluidos como solventes poderia modelar um ambiente que favoreceria a evolução de uma bioquímica não terrestre. Outros processos químicos podem satisfazer o impulso termodinâmico para o surgimento da vida através de mecanismos alternativos, conseqüentemente produzindo assinaturas químicas diferentes da bioquímica terrestre.

4.4.1 Habitabilidade

Habitabilidade, no contexto astrofísico, é definida pelo conjunto de características que permitem um planeta rochoso abrigar vida. Isso não significa, necessariamente, que o planeta tenha que abrigar vida ou que ele apresente as características necessárias para isso. Somente podemos considerar habitabilidade do ponto de vista do sucesso na Terra, portanto dentro desse conjunto devem estar, entre outras condições: a) a presença de uma fonte de energia necessária para o metabolismo, b) os elementos químicos para formar as biomoléculas (CHONPS), c) a existência de um planeta rochoso que possa abrigar essas biomoléculas e d) um solvente para viabilizar as reações químicas (como descrito, por exemplo, em Domagal-Goldman *et al.* (2016), Kaltenegger (2017)). Deve ser ressaltado que condições geofísicas e geológicas foram também essenciais para a habitabilidade na Terra, tais como a presença de campo magnético, o movimento das placas tectônicas, e a presença de escudos naturais como a Lua e Júpiter. Essas condições não serão discutidas neste artigo.

Estrelas com massa muito maior do que $\sim 1,5 M_{Sol}$ tem uma vida menor que 3 bilhões de anos, evoluindo para o estágio de anã branca após a fase de nova. Isso faz com que elas não se adequem ao item a), pois espera-se que estrelas que sejam uma fonte de energia estável para possibilitar a evolução da vida permaneçam na Sequência Principal por, pelo menos, o tempo aproximado que o Sol permanece – cerca de 10 bilhões de anos. O item b) é contemplado pela química da nuvem que dá origem aos sistemas protoplanetários, possivelmente baseada nos **CHONPS**. A composição química determina a condição de habitabilidade de uma determinado região, em função da abundância, versatilidade de combinação dos elementos químicos disponíveis e pelo fato de os CHONPS formarem as estruturas fundamentais da vida como a conhecemos.

Quanto mais próximo da data atual, mais enriquecido quimicamente deve ser o meio que formará o disco e, provavelmente, per-

mitirá a formação de planetas rochosos, o que leva ao item c). Planetas rochosos apresentam a interface sólido-líquido necessária à diversidade de condições evolutivas que eventualmente surgirão. Do ponto de vista químico, a água é considerada o candidato mais adequado ao papel de solvente, atendendo ao item d). Essa escolha deve-se a diversas características, entre elas a de ser uma molécula bastante abundante no Universo, permanecer no estado líquido durante um intervalo de temperatura muito maior do que o de outros solventes e permitir um bom isolamento térmico e elétrico no meio celular e intercelular.

A descoberta sistemática de novos exoplanetas já contabiliza, em fins de 2023, 5557 planetas, 10053 candidatos a planetas e 4137 sistemas planetários, e tem possibilitado uma melhor compreensão, e mesmo reavaliações, do conceito de ZH, à luz da dinâmica planetária e da energética disponível em estrelas de massa menor que $\sim 1 M_{Sol}$. Os exoplanetas do tipo terrestre encontrados permitem especular um futuro promissor para atender ao critério c) listado no parágrafo anterior. Condições muito diversas das encontradas no nosso Sistema Solar exigem uma reanálise das possibilidades de formação e estabilidade de órbitas planetárias, implicando em grande diversidade de condições atmosféricas para os exoplanetas do tipo terrestre.

Modelos evolutivos da atmosfera terrestre, considerando fatores como oceanos, desertos, vegetação e cobertura de nuvens são usados para obter as características ambientais planetárias cuja assinatura espectral possa ser usada para deduzir condições de habitabilidade ou fornecer indicações da presença de vida (ver, e.g., Kaltenegger *et al.* (2007), Kaltenegger (2017)). Situações particulares que permitam a existência de água líquida fora da ZH devem ser consideradas, como é o caso de Europa, satélite de Júpiter, ou Enceladus, satélite de Saturno onde a água é mantida líquida pelo aquecimento de seu interior devido às forças de maré. O estudo de exoplanetas é uma área em que alguns grupos no Brasil vem mantendo uma atividade regular há mais de 10 anos, em particular com forte participa-

ção do INPE e da Universidade Presbiteriana Mackenzie (Martioli (2006), Gould *et al.* (2010), Hwang *et al.* (2013), Kains *et al.* (2013), Street *et al.* (2013), Han *et al.* (2013), Almeida *et al.* (2013), Henderson *et al.* (2014), Tusnski e Valio (2014), Skowron *et al.* (2015), Valio *et al.* (2017)).

Há diversos autores que consideram o Universo como um “ambiente biofílico” dentro do contexto Λ CDM, com base no argumento de que os **CHONPS** necessários para o aparecimento de compostos biológicos existem desde que o Universo tinha ~ 100 milhões de anos, conforme apresentado em Corazza (2017). Outros autores (Loeb (2014), Loeb (2016), Loeb *et al.* (2016b)) consideram que estes elementos podem ter sido produzidos quando o Universo era ainda mais jovem (com cerca de 30 milhões de anos) e sugerem um enriquecimento de C em estrelas de baixa massa (tipos espectrais K e M), as chamadas “CEMP stars” (Mashian e Loeb (2016)). Eles também argumentam que, a menos que a habitabilidade em torno de estrelas de baixa massa seja suprimida, a probabilidade de existência de vida, daqui a 10 trilhões de anos, será maior ao redor de estrelas com cerca de $0,1M_{Sol}$. Nesse contexto a habitabilidade cósmica seria possível logo depois da formação da primeira geração de estrelas, após o Big Bang, e terminaria somente cerca de 10 trilhões de anos depois, quando todas as estrelas terão esgotado seu ciclo na Sequência Principal.

Recentemente, Adams e colaboradores (Adams *et al.* (2015), Adams (2016)) analisaram a influência dos valores da constante de estrutura gravitacional (definida como $\alpha_G \equiv Gm_p^2/\hbar c$) e da constante de estrutura fina $\alpha \equiv e^2/\hbar c$, sobre as condições de habitabilidade do Universo, e concluíram que essas condições são preservadas mesmo variando os parâmetros por algumas ordens de grandeza. Análise similar foi feita considerando a influência de variações na amplitude das flutuações de densidade primordial (Q) sobre a formação de estrelas, concluindo que, caso existam outros universos com constantes físicas cujos valores estejam nos limites analisa-

dos, as condições de habitabilidade seriam mais favoráveis e diversificadas do que as que encontramos no nosso.

Um Universo “viável”, em termos de Habitabilidade, é definido pelo intervalo de valores de G que permite a existência de reações nucleares para formar estrelas e planetas habitáveis. Apesar de Adams analisar somente duas constantes físicas, α e G , e de ser desconhecida a distribuição de probabilidades a partir da qual os possíveis universos “escolhem” os valores dessas constantes, elas podem variar no intervalo de algumas ordens de grandeza, dentro do espaço de parâmetros permitidos, e ainda permitir Universos “viáveis”. Mesmo considerando-se um conjunto grande de vínculos restritivos, o limite encontrado de $\alpha_G \simeq 10^{-34}$ sugere que Universos habitáveis podem existir dentro uma grande hierarquia de intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética.

4.5 Condições sobre a vida

Uma definição operacional ou uma teoria que descreva o fenômeno da vida é essencial para a distinção de formas de vida diferentes das observadas na Terra. Particularmente, a importância cresce à medida que novas missões para estudar corpos do sistema solar em busca de evidências de vida são propostas pelas agências espaciais de todo o mundo. Cleland e Chyba (2002) evidenciam essa importância: *“À medida que a ciência progride na compreensão da origem da vida na Terra (...) e com a atenção concentrando-se na astrobiologia e na busca pela vida em Marte e em Europa, lua de Júpiter, aumenta a necessidade de uma definição geral de vida”*.

Até o momento, não há uma definição que seja aceita pela comunidade ligada à Astrobiologia, independentemente do foco da disciplina envolvida (Trifonov (2012)), e a dificuldade é objeto de estudo de vários programas em andamento no mundo todo. Discussões mais detalhadas sobre as dificuldades dessa definição e as implicações que ela traria à comunidade podem ser encontradas,

e.g., em Bedau e Cleland (2010); Benner (2010). Não havendo uma teoria geral sobre a natureza de sistemas vivos, nenhuma das definições de vida fornece uma resposta satisfatória. Assim, é recomendável utilizar uma abordagem científica cautelosa e ao mesmo tempo flexível, que auxilie sua identificação minimizando as chances de excluir possíveis sistemas vivos muito diferentes dos existentes na Terra. Algumas características parecem ser comuns a praticamente todos os sistemas vivos conhecidos e tem sido alvo de estudos durante as últimas décadas para sua melhor determinação, como descrito por Szostak e colaboradores (2002).

Koshland (2002) propõe que sejam utilizados princípios termodinâmicos e cinéticos essenciais para que um sistema vivo, tal como o conhecemos, possa existir. Eles foram denominados “pilares da vida” e agrupados sob o acrônimo PICERAS, que significa: Programa; Improvisação; Compartimentalização; Energia; Regeneração; Adaptabilidade; e Isolamento (do inglês, Seclusion). Ainda assim, nem sempre o que é vivo apresenta todas essas características e nem sempre todas elas correspondem a algo vivo.

No Programa da NASA de Estudos dos Limites da Vida Orgânica em Sistemas Planetários (Hays (2015)) foram adotadas as seguintes características para tentar caracterizar um sistema vivo, a saber: ausência de equilíbrio termodinâmico; dependência da manutenção da taxa de variação da entropia (com valores negativos indicando o aumento de organização); manutenção de seu estado organizado, aumentando a entropia da vizinhança; presença de metabolismo, complexidade e organização; a existência de mecanismos de reprodução; e capacidade de desenvolvimento, evolução e autonomia. Essas características são responsáveis pelas funções básicas observadas nos sistemas vivos terrestres: adquirir energia do meio e convertê-la para a forma química; possuir uma rede de reações químicas, envolvendo os elementos químicos adequados (os **CHONPS**) em solvente apropriado, que sintetizam os compostos necessários para manutenção, crescimento e autorreplicação; e utilização de compostos químicos capazes de armazenar grandes

quantidades de informação para que o sistema tenha condições de se autorreplicar e autopropagar.

4.5.1 Dos átomos aos sistemas vivos

Desde o início do Universo, a matéria tem evoluído na direção de formas mais complexas. Nos instantes iniciais H e He foram produzidos e, posteriormente, outros elementos emergiram em decorrência da evolução das estrelas. Apesar de terem sido formados mais de 100 elementos químicos, os elementos C, H, O e N compõem boa parte dos compostos químicos observados no Universo, devido à facilidade com que eles formam ligações covalentes, produzindo uma grande variedade de moléculas no meio interestelar.

As primeiras moléculas orgânicas formadas continham um pequeno número de átomos, mas tinham a capacidade de formar compostos diferentes através de várias reações. As transformações de ácido cianídrico (HCN) em cianoacetileno (HC_3N) e cianamida (CH_2N_2) e daí em aminoácidos e bases nucleicas é semelhante à transformação de formaldeído (CH_2O) em açúcar. O experimento de S. Miller mostrou que uma atmosfera contendo as moléculas CH_4 , NH_3 , H_2 e vapor d'água, submetida a descargas elétricas formam glicina, α -alanina e β -alanina (Miller (1953)). Experimentos posteriores realizados por S. Fox (1958, 1972) mostraram que o fluxo de CH_4 através de uma solução concentrada de NH_4OH incidindo sobre uma superfície similar à lava vulcânica ou sílica, com temperatura de 1000 °C levou à formação de 12 aminoácidos (ácido aspártico, ácido glutâmico, glicina, alanina, valina, leucina, isoleucina, serina, treonina, prolina, tirosina e fenilalanina), potenciais percussores do RNA (Bada (2004), Powner (2009), Hud (2013)).

As análises de amostras obtidas em experimentos similares (Parker *et al.* (2011)), com uma mistura de CH_4 , H_2S , NH_3 , e CO_2 , mostraram a formação de 23 aminoácidos e 4 aminas, incluindo 7 compostos organosulfurados. As abundâncias medidas nesse ex-

perimento são compatíveis com medidas em alguns meteoritos do tipo condritos carbonáceos. De acordo com Parker, os resultados sugerem que a mistura de gases, incluindo H_2S , deve ter ajudado na síntese de aminoácidos e aminas na Terra primitiva e durante o processo de formação do Sistema Solar. Já o ambiente contendo H_2S utilizado por Miller em seu experimento parece não ter sido comum na Terra primitiva, embora fosse possível encontrá-lo próximo a vulcões.

Apesar dos organismos celulares possuírem sofisticada capacidade metabólica, a origem de sua rede de reações é pouco conhecida (Luisi (2012)). A estrutura central das redes metabólicas é similar em todos os organismos conhecidos estudados (Jeong *et al.* (2000), Braakman e Smith (2013)) levando a crer que estes mecanismos surgiram nos primórdios da evolução celular. Uma hipótese sobre a origem do metabolismo é que as redes de reação se estabeleceram na Terra prebiótica como consequência do ambiente físico e químico do local onde a vida emergiu pela primeira vez, reforçando a hipótese de Bains (Bains (2004)) de que o solvente disponível molda a química necessária à vida. Com base nesses argumentos, pode-se imaginar que a sequência de reações químicas principais no metabolismo atual (glicólise e reações pentoses-fosfato) deve ser muito semelhante à do primeiro organismo vivo (Braakman e Smith (2013), Shapiro (2000), Huber *et al.* (2002)).

De acordo com Keller e colaboradores (Keller *et al.* (2014)) a sequência de reações que constituem o metabolismo central do C poderia ser restringida pelo ambiente do oceano rico em ferro do Arqueano, indicando que os primeiros processos metabólicos poderiam ter se originado no mundo prebiótico. Esses resultados sugerem que compostos prebióticos complexos, como aminoácidos e proteínoides, poderiam fazer parte de uma rede complexa de reações químicas alimentada pela energética presente na atmosfera primitiva da Terra, levando à formação de proteínas e ao conjunto de reações que compõem o metabolismo central das células atuais. A possibilidade de que essa química pode ter começado na nuvem

protoestelar fica evidente nas observações atuais de moléculas complexas nas nuvens de gás e poeira no meio interestelar, como mostrado nas seções 3.2 e 3.3, e na composição química dos meteoritos condritos carbonáceos, como o meteorito de Murchison (P. Schmitt-Kopplin *et al.* (2012)). Dessas moléculas são formados os vinte aminoácidos, cinco bases nucleicas (nucleobases), dois açúcares, glicérol, um aminoálcool (colina) e um ácido graxo (ácido palmítico) necessários para formar um sistema vivo (Olomucki (1993)).

A transição de sistemas não-vivos → vivos a partir de processos físico-químicos ainda é desconhecida e provavelmente ocorreu em sistemas muito pouco autopoieticos³ e fora da homeostase⁴. Mesmo que essa transição tenha ocorrido mais de uma vez, ou muitas vezes, devido às alterações ambientais extremas que ocorreram na Terra jovem, em algum momento ela se estabeleceu definitivamente, dando origem às formas de vida observadas hoje. Elas têm relação direta com as condições de habitabilidade no disco protoplanetário e, mais remotamente, com as condições biofílicas geradas após o surgimento das primeiras estrelas. Novamente, usando a argumentação acima e a visão proposta por Bains (2004), diferentes condições de habitabilidade, particularmente “locais”, derivadas da formação do disco protoplanetário, podem, eventualmente, dar origem a formas de vida distintas da que conhecemos, caso elas sejam capazes de emergir dos processos físico-químicos locais.

4.6 Considerações Finais

O modelo Λ CDM é o melhor cenário para descrever a formação das primeiras estruturas do Universo e indica que os elementos fundamentais à vida (**CHONPS**) foram criados no Universo por

³Autopoietico: capaz de reproduzir a si próprio.

⁴Homeostase: capacidade do organismo vivo de apresentar uma situação físico-química característica e constante, dentro de determinados limites, mesmo diante de alterações impostas pelo meio ambiente.

volta de 100 milhões de anos. Em decorrência da expansão, resfriamento e interação gravitacional, as flutuações primordiais de densidade de matéria condensaram-se, formando imensas nuvens de gás, possibilitando a formação das primeiras estrelas, o início do processo de enriquecimento químico do Universo e a subsequente formação de poeira e moléculas complexas. Observações astronômicas, aliadas a simulações numéricas da química do meio interestelar, indicam que moléculas orgânicas complexas foram criadas em nuvens moleculares e sugerem que os compostos necessários ao surgimento da vida, como a conhecemos, estão disponíveis e espalhados no Universo há vários bilhões de anos. Entretanto, o passo para formar o primeiro sistema vivo a partir de um conjunto de moléculas complexas ainda é desconhecido.

A combinação das condições de habitabilidade apresentadas na seção 4 permitiram que a Terra abrigasse um primeiro sistema vivo (ou diversos?) que conseguiu sobreviver e evoluir, tanto no aspecto de complexidade, no caso dos eucariontes, quanto no aspecto de adaptabilidade, no caso de bactérias e arqueobactérias. Há diversas evidências geológicas e geofísicas no sentido de que estes foram os passos para o surgimento e evolução da vida na Terra. Embora a compreensão do(s) mecanismo(s) de transição de um sistema não-vivo para vivo a partir de processos físico-químicos locais seja um tema bastante desafiador, um dos principais pontos deste artigo é argumentar que as condições físico-químicas necessárias (e, talvez, suficientes) para o aparecimento da vida, tal como a conhecemos, são comuns e remontam à formação das primeiras estrelas e ao enriquecimento químico do Universo como um todo.

É perfeitamente aceitável especular que a química da vida não seja necessariamente baseada em C e H₂O, porém outras possibilidades dependem do mesmo processo de enriquecimento químico universal. Mesmo que o Si seja menos abundante e menos versátil quimicamente, e que os solventes mencionados na subseção 4.1 sejam menos versáteis, do ponto de vista termodinâmico, a enorme quantidade de exoplanetas encontrados até o momento e a escala de tempo

evolutivo de outros sistemas planetários, em comparação com o Sistema Solar, permite aceitar que as condições consideradas como prebióticas na Terra existam em vários outros pontos do Universo.

Por fim, é importante destacar que este capítulo resultou das discussões ocorridas durante a disciplina “Fundamentos de Astrobiologia”, ministrada no programa de pós-graduação em Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2016 e é parte do esforço de alguns dos autores em oferecer um enfoque “astrobiológico” a determinados projetos de pesquisa ligados ao programa.

4.7 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Isaac Joukhadar pelas muitas horas de discussão durante a seção sobre a definição de vida. Este texto é dedicado à memória de Frederico Augusto Silva Vieira (1984 – 2023).

Referências

G.F. Smoot, C.L. Bennett, A. Kogut, E.L. Wright, J. Aymon, N.W. Boggess, E.S. Cheng, G. de Amici, S. Gulkis, M.G. Hauser *et al.*, *Astrophys. J.* 396, L1 (1992).

C.L. Bennett, A. Kogut, G. Hinshaw, A.J. Banday, E.L. Wright, K. Gorski, D.T. Wilkinson, R. Weiss, G.F. Smoot, S.S. Meyer *et al.*, *Astrophys. J.* 436, 423 (1994).

C.L. Bennett, R.S. Hill, G. Hinshaw, M.R. Nolta, N. Odegard, L. Page, D.N. Spergel, J.L. Weiland, E.L. Wright, M. Halpern *et al.*, *Astrophys. J.* 148, 97 (2003).

C.L. Bennett, D. Larson, J.L. Weiland, N. Jarosik, G. Hinshaw, N. Odegard, K.M. Smith, R.S. Hill, B. Gold, M. Halpern *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* 208, 20 (2013).

N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A.J. Banday, R.B. Barreiro, J.G. Bartlett, N. Bartolo *et al.*, *Astron. Astrophys.* 594, A13 (2016).

- C. Patrignani, K. Agashe, G. Aielli, C. Amsler, M. Antonelli, D.M. Asner, H. Baer, S. Banerjee, R.M. Barnett, T. Basaglia *et al.*, *Chinese Physics C*, 40, 100001 (2016).
- P.A.R. Ade, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi *et al.*, *Astron. Astrophys* 641, A6 (2020).
- A. Loeb, *International Journal of Astrobiology* 13, 337 (2014).
- A. Loeb, *ArXiv:1606.08926* (2016).
- S. Naoz, S. Noter e R. Barkana, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 373, L98 (2006).
- K. Nomoto, C. Kobayashi e N. Tominaga, *Ann. Rev. Astron. Astrophys* 51, 457 (2013).
- U. Maio e E. Tescari, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 453, 3798 (2015).
- G. Kulkarni, J.F. Hennawi, E. Rollinde e E. Vangioni, *Astrophys. J.* 787, 64 (2014).
- A. Tielens, *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
- E. Herbst e E.F. van Dishoeck, *Ann. Astron. Astrophys.* 47, 427 (2009).
- R.T. Garrod, *Astrophys. J.* 765, 60 (2013).
- P. Caselli e C. Ceccarelli, *The Astron. Astrophys. Rev.* 20, 56 (2012).
- Palmer *et al.* (1996). In: AAS Meeting Abstracts, 188, 62.12 (1996).
- N. Dello Russo, *et al.* *J. Geophys. Res.*, 107(E11) (2002).
- M. Bird *et al.* *Astron. & Astrophys.*, 325, L5-L8 (1997).
- P. Ehrenfreund e S.B. Charnley, *Ann. Astron. Astrophys.* 38, 427 (2000).
- E.F. van Dishoeck e G.A. Blake, *Ann. Astron. Astrophys.* 36, 317 (1998).
- S.R. Taylor, *Solar System Evolution: a New Perspective* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
- A.N. Youdin e S.J. Kenyon *From Disks to Planets* (Springer Netherlands, Dordrecht, 2013).
- J.P. Williams e L.A. Cieza, *Ann. Astron. Astrophys.* 49, 67 (2011).
- M. Olomucki, *The Chemistry of Life* (McGraw-Hill, Poughkeepsie, 1993).

H. Cottin, J.M. Kotler, K. Bartik, H.J. CleavesII, C.S. Cockell, J.P.P. de Vera, P. Ehrenfreund, S. Leuko, I.L.T. Kate, Z. Martins *et al.*, *Space Science Reviews* 209, 1 (2015).

C.M.D. Santos, L.P. Alabi, A.C.S. Fria,ca e D. Galante, *International Journal of Astrobiology* 15, 251 (2016).

G. Horneck, N. Walter, F. Westall, J.L Grenfell, W.F. Martin, F. Gomez, S. Leuko, N. Lee, S. Onofri, K. Tsiganis *et al.*, *Astrobiology* 16, 201 (2016).

J. Quillfedt, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* 27, 685 (2010).

A.D. Neto, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* 27, 641 (2010).

I.G. Paulino-Lima e C.A.S. Lage, *Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira* 29, 14 (2010).

J.A.F. Pacheco, *Ciência Hoje* 318, 35 (2014).

G. Zubay, *Origins of life on the Earth and in the Cosmos* (Academic Press, San Diego, 2000).

J. Lunine, *Astrobiology: a multi-disciplinary approach* (Pearson Addison Wesley, Boston, 2004).

A. Shaw, *Astrochemistry: From Astronomy to Astrobiology* (John Wiley e Sons, Hoboken, 2006).

G. Horneck e P. Rettberg, *Complete Course in Astrobiology* (John Wiley e Sons, Hoboken, 2008).

C. Cockell *Astrobiology: understanding life in the cosmos* (Wiley-Blackwell, Londres, 2015).

A. Longstaff, *Astrobiology: An Introduction* (CRC Press, Fl´orida, 2015).

D. Galante, E.P. da Silva, F. Rodrigues, J.E. Horvath e M.G.B. de Avellar, *Astrobiologia: uma ciência emergente* (Tikinet, São Paulo, 2016).

E. Calabrese, R.A. Hloˇzek, J.R. Bond, M.J. Devlin, J. Dunkley, M. Halpern, A.D. Hincks, K.D. Irwin, A. Kosowsky, K. Moodley *et al.*, *Phys. Rev. D.* 95, 063525 (2017).

J. Dunkley, E. Calabrese, J. Sievers, G.E. Addison, N. Battaglia, E.S. Battistelli, J.R. Bond, S. Das, M.J. Devlin, R. D`unner *et al.*, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2013, 025 (2013).

R. Hlozek, J. Dunkley, G. Addison, J.W. Appel, J.R. Bond, C.S. Carvalho, S. Das, M.J. Devlin, R. Dünner, T. Essinger-Hileman *et al.*, *Astrophys. J.* 749, 90 (2012).

J.L. Sievers, R.A. Hlozek, M.R. Nolta, V. Acquaviva, G.E. Addison, P.A.R. Ade, P. Aguirre, M. Amiri, J.W. Appel, L.F. Barrientos *et al.*, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 10, 060 (2013).

R.R. Lindner, P. Aguirre, A.J. Baker, J.R. Bond, D. Crichton, M.J. Devlin, T. Essinger-Hileman, P. Gallardo, M.B. Gralla, M. Hilton *et al.*, *Astrophys. J.* 803, 79 (2015).

C.L. Reichardt, L. Shaw, O. Zahn, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang, H.M. Cho, T.M. Crawford *et al.*, *Astrophys. J.* 755, 70 (2012).

E. Shirokoff, C.L. Reichardt, L. Shaw, M. Millea, P.A.R. Ade, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang *et al.*, *Astrophys. J.* 736, 61 (2011).

K.T. Story, C.L. Reichardt, Z. Hou, R. Keisler, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang, H.M. Cho *et al.*, *Astrophys. J.* 779, 86 (2013).

<http://www.sdss.org/collaboration/citing-sdss/>, acessado em 09/07/2017.

S.J. Maddox, G. Efsthathiou, W.J. Sutherland e J. Loveday, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 243, 692 (1990).

<http://www.2dfgrs.net/>, acessado em 09/07/2017.

<http://www.6dfgrs.net/>, acessado em 09/07/2017.

A.G.G.M. Tielens, *Rev. Mod. Phys.* 85, 1021 (2013).

A. Loeb e S. Furlanetto, *The First Galaxies in the Universe*. (Princeton University Press, Princeton, 2013).

S. Wilson, P.F. Bernath e R. McWeeny's, *Handbook of Molecular Physics and Quantum Chemistry*, 3 Volume Set (Wiley, Bognor Regis, 2003).

W. Short e I. Cairns, *In Proceedings from 8th Australian Space Science Conference* (National Space Society of Australia Ltd, Sydney, 2009).

D. Hollenbach e E.E. Salpeter, *Astrophys. J.* 163, 155 (1971).

R. Pagni, *Journal of Chemical Education* 84, 233 (2007).

H.I. Ewen e E.M. Purcell, *Nature* 168, 356 (1951).

- H.C. van de Hulst, *Astron. J.* 56, 144 (1951).
- A.C. Cheung, D.M. Rank, C.H. Townes, D.D. Thornton e W.J. Welch, *Physical Review Letters* 21, 1701 (1968).
- A.C. Cheung, D.M. Rank, C.H. Townes, D.D. Thornton e W.J. Welch, *Nature* 221, 626 (1969).
- R.W. Wilson, K.B. Jefferts e A.A. Penzias, *Astrophys. J. Lett.* 161, L43 (1970).
[61] S. Kwok, *Astrophys. Space Science* 319, 5 (2009).
- S. Kwok, *Organic Matter in the Universe* (Wiley, Weinheim, 2011).
- E. Van Dishoek, *Ann. Rev. Astron. Astrophys* 42, 119167 (2004).
- T. Henning e D. Semenov, *Chemical Reviews* 113, 9016 (2013).
- A. Brack, *Chemistry e Biodiversity* 4, 665 (2007).
- Y. Aikawa, E. Herbst, H. Roberts e P. Caselli, *Astrophys. J.* 620, 330 (2005).
- R.T. Garrod, *Astrophys. J.* 778, 158 (2013).
- S.S. Huang, *Publ. of the Astr. Soc. of the Pacific* 71, 421 (1959).
- C.H. Lineweaver, Y. Fenner e B.K. Gibson, *Science* 303, 59 (2004).
- P. Ward e D. Brownlee, *S'os no Universo? Porque a vida inteligente é impossível fora do planeta Terra.* (Campus, São Paulo, 2000).
- G. Gonzalez, D. Brownlee e P. Ward, *Icarus* 152, 185 (2001).
- W. Bains, *Astrobiology* 4, 137 (2004).
- S.D. Domagal-Goldman, K.E. Wright, K. Adamala, L.A. de la Rubia, J. Bond, L.R. Dartnell, A.D. Goldman, K. Lynch, M.E. Naud, I.G. Paulino-Lima *et al.*, *Astrobiology* 16, 561 (2016).
- L. Kaltenegger, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 55, 433 (2017).
- L. Kaltenegger, W.A. Traub e K.W. Jucks, *Astrophys. J.* 658, 598 (2007).
- E. Martioli, *Exoplanetas: o que são e como detectá-los..* Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2006).
- A. Gould, S. Dong, B.S. Gaudi, A. Udalski, I.A. Bond, J. Greenhill, R.A. Street, M. Dominik, T. Sumi, M.K. Szymański *et al.*, *Astrophys. J.* 720, 1073 (2010).

- K.H. Hwang, J.Y. Choi, I.A. Bond, T. Sumi, C. Han, B.S. Gaudi, A. Gould, V. Bozza, J.P. Beaulieu, Y. Tsapras *et al.*, *Astrophys. J.* 778, 55 (2013).
- N. Kains, R.A. Street, J.Y. Choi, C. Han, A. Udalski, L.A. Almeida, F. Jablonski, P.J. Tristram, U.G. Jørgensen, M.K. Szymański *et al.*, *Astron. Astrophys.* 552, A70 (2013).
- R.A. Street, J.Y. Choi, Y. Tsapras, C. Han, K. Furusawa, M. Hundertmark, A. Gould, T. Sumi, I.A. Bond, D. Wouters *et al.*, *Astrophys. J.* 763, 67 (2013).
- C. Han, A. Udalski, J.Y. Choi, J.C. Yee, A. Gould, G. Christie, T.G. Tan, M.K. Szymanski, M. Kubiak, I. Soszynski *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* 762, L28 (2013).
- L.A. Almeida, F. Jablonski e C.V. Rodrigues, *Astrophys. J.* 766, 11 (2013).
- C.B. Henderson, H. Park, T. Sumi, A. Udalski, A. Gould, Y. Tsapras, C. Han, B.S. Gaudi, V. Bozza, F. Abe *et al.*, *Astrophys. J.* 794, 7 (2014).
- L.R.M. Tusnski e A. Valio, *In Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets*, editado por N. Haghighipour, (Cambridge University Press, Cambridge, 2014).
- J. Skowron, I.G. Shin, A. Udalski, C. Han, T. Sumi, Y. Shvartzvald, A. Gould, D. Dominis Prester, R.A. Street, U.G. Jørgensen *et al.*, *Astrophys. J.* 804, 33 (2015).
- A. Valio, R. Estrela, Y. Netto, J.P. Bravo e J.R. de Medeiros, *Astrophys. J.* 835, 294 (2017).
- L.C. Corazza, *The Role of Population II and III Stars in the Cosmic Chemical Evolution*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2017).
- A. Loeb, R.A. Batista e D. Sloan, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 8, 040 (2016).
- N. Mashian e A. Loeb, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 460, 2482 (2016).
- F.C. Adams, K.R. Coppess e A.M. Bloch, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 9, 030 (2015).
- F.C. Adams, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 02, 042 (2016).
- C.E. Cleland e C.F. Chyba, *Orig. Life Evol. Biosph.* 32, 387 (2002).
- E.N. Trifonov, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics* 29, 647 (2012).
- M.A. Bedau e C.E. Cleland, *The Nature of Life* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).

S. Benner, *Astrobiology* 10, 1021 (2010).

J.W. Szostak, J.C. Wheeler, S.A. Benner, J.A. Berry, R. Blake, W.M. Calvin, M.J. Daly, K.H. Freeman, J.P. Gogarten, J.F. Kasting *et al.*, *The Astrophysical Context of Life* (National Research Council, Washington, 2005).

D.E. Koshland, *Science* 295, 2215 (2002).

L. Hays, *NASA Astrobiology Strategy* (NASA, Washington, 2015).

S.L. Miller, *Science* 117, 528 (1953).

S.W. Fox e K. Dose, *Molecular Evolution and the Origin of Life* (W.H. Freeman e Co Ltd, San Francisco, 1972).

S.W. Fox e K. Harada, *Science* 128, 1214 (1958).

J.L. Bada, *Earth and Planetary Science Letters* 226, 1 (2004).

M.W. Powner, B. Gerland e J.D. Sutherland, *Nature* 459, 239 (2009).

N.V. Hud, B.J. Cafferty, R. Krishnamurthy e L.D. Williams, *Chem. Biol.*, 20, 466 (2013).

E.T. Parker, H.J. Cleaves, J.P. Dworkin, D.P. Glavin, M. Callahan, A. Aubrey, A. Lazcano e J.L. Bada, *PNAS* 108, 5526 (2011).

P.L. Luisi, *Chemistry e Biodiversity*, 9, 2635 (2012).

H. Jeong, B. Tombor, R. Albert, Z.N. Oltvai e A.L. Barabási, *Nature* 407, 651 (2000).

R. Braakman e E. Smith, *Phys Biol* 10, 011001 (2013).

R. Shapiro, *IUBMB Life* 49, 173 (2000).

H. Huber, M.J. Hohn, R. Rachel, T. Fuchs, V.C. Wimmer e K.O. Stetter, *Nature* 417, 63 (2002).

M.A. Keller, A.V. Turchyn e M. Ralser, *Molecular Systems Biology* 10, 725 (2014).

P. Schmitt-Kopplin, Z. Gabelica, R.D. Gougeon, A. Fekete, B. Kanawati, M. Harir, I. Gebefuegi, G. Eckel e N. Hertkorn, *PNAS* 107, 2763 (2010).



1ª. edição: Maio de 2024
Tiragem: 300 exemplares
Formato: 16 x 23 cm
Mancha: 12,3 x 19,9 cm
Tipografia: Crimson Pro 12
Libertinus Sans 8/10/12/14/18
Palatino Linotype 10/11/12
Impressão: Offset 90 g/m²
Gráfica: Prime Graph