

O CÉU QUE NOS ENVOLVE

LIVRO DO EDUCADOR

INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA PARA EDUCADORES E INICIANTES

EDIÇÃO E COORDENAÇÃO: ENOS PICAZZIO



ÍNDICE

Cap. 2 - Instrumentos e técnicas astronômicas	5
Cap. 3 - Movimento aparente do céu	12
Cap. 4 - A Terra	20
Cap. 5 - Sistemas planetários	29
Cap. 6 - Sol	42
Cap. 7 - Estrelas	46
Cap. 8 - A Via Láctea	50
Cap. 9 - Galáxias	58
Cap. 10 - Cosmologia	67
Cap. 11 - À procura de vida fora da Terra	75

CAPÍTULO 2 - INSTRUMENTOS E TÉCNICAS ASTRONÔMICAS

Roberto D. Dias da Costa

OBJETIVOS

O capítulo visa dar ao leitor uma visão geral da instrumentação moderna usada em pesquisas astronômicas. No início é feita uma descrição sobre a natureza da luz, vista como radiação eletromagnética: como ela se divide em faixas de energia, o que é a *emissão de corpo negro*, como se mede a energia que vem de uma fonte luminosa e como a atmosfera da Terra interfere com a radiação que vem dos corpos celestes.

São descritos os telescópios astronômicos, desde os modelos básicos usados por astrônomos amadores até os modernos telescópios profissionais atualmente em uso ou em construção. Com esta descrição espera-se que o leitor aprenda como é obtida e registrada a informação proveniente de fontes no céu que chega a nós na forma de luz. Também com este objetivo são descritos os dispositivos de registro da informação, ou seja, das imagens. É descrita a fotografia e, posteriormente, o surgimento dos detectores eletrônicos que atualmente equipam virtualmente todas as câmeras, sejam elas amadoras ou profissionais.

O capítulo também mostra ao leitor que a luz não é a única fonte de informação sobre os objetos celestes. Ela pode ser obtida de meteoritos, de sondas que viajam pelo sistema solar, ou mesmo a partir de detectores de partículas tais como neutrinos ou raios cósmicos, bem como de ondas gravitacionais.

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 A NATUREZA DA LUZ

1. A luz como radiação eletromagnética

A luz é uma forma de radiação eletromagnética e chega até nós em diversas faixas de comprimento de onda: dos raios gama às ondas de rádio, sendo que a luz visível corresponde apenas a uma pequena faixa de energia da radiação.

2. Espectro eletromagnético

Espectro eletromagnético é a distribuição de todas as faixas de energia da luz, desde as mais baixas energias que correspondem às ondas de rádio até as mais altas, que correspondem aos raios X e raios gama.

3. Radiação térmica

Todos os corpos, sem exceção, emitem um espectro de radiação. A mesma é descrita pela *curva de corpo negro* do respectivo objeto, e depende de sua temperatura efetiva.

4. Espectroscopia

A luz visível pode ser decomposta através de um sistema óptico que envolve prismas ou redes de difração. Assim decomposta, a luz permite analisar a natureza da fonte emissora, obtendo-se informações como sua temperatura efetiva e composição química.

5. A atmosfera da Terra e a interação com a radiação

A atmosfera deixa passar apenas uma fração da radiação incidente. Enquanto que a luz visível é transmitida com poucas perdas, a atmosfera é opaca à radiação de mais energia como os raios X e gama. Como essa radiação é nociva à matéria orgânica, tal característica possibilitou a evolução da vida. Na faixa das ondas de rádio, a atmosfera permite passar apenas algumas faixas de frequência.

2.2 TELESCÓPIOS

1. Elementos de óptica

Telescópios são coletores de luz caracterizados através de parâmetros básicos: *abertura* é o diâmetro da área coletora de luz; *poder separador* descreve a habilidade do instrumento para visualizar pequenos ângulos no céu; *distância focal* e *razão focal* descrevem qual a área do céu vista por um telescópio; e *magnificação* é o poder de aumento de um telescópio.

2. Telescópios ópticos

De acordo com sua óptica, telescópios podem ser classificados como *refratores* (aqueles em que a luz é captada por uma lente objetiva), *refletores* (aqueles em que a luz é captada por um espelho côncavo) e *catadióptricos* (aqueles que combinam lentes e espelhos para captar luz). Cada tipo tem características positivas e negativas porém os telescópios profissionais modernos são todos refletores. Um mesmo telescópio pode ter distintos focos, dependendo da posição em que é formada a imagem, e também pode ser montado de duas maneiras distintas para compensar a rotação da Terra: numa montagem altazimutal ou equatorial.

3. Detectores de luz

Depois de milênios registrando as observações do céu apenas através de desenhos, a partir de meados do século 19 a fotografia permitiu um registro preciso do que era visto pelos astrônomos. A partir dos anos 1980 surgiram os detectores eletrônicos de imagem tipo CCD que aos poucos ocuparam o lugar dos antigos filmes fotográficos e atualmente equipam todas as câmeras, tanto amadoras quanto profissionais.

4. Radiotelescópios

Radiotelescópios permitem observar fontes no céu nas faixas das ondas de rádio. Em diversos aspectos eles são análogos aos telescópios ópticos, porém as áreas coletoras são muito maiores, existindo instrumentos com muitas dezenas e mesmo com centenas de metros de diâmetro.

5. Telescópios no espaço

Existem telescópios no espaço, em satélites que orbitam a Terra. Estes instrumentos permitem examinar fontes no céu em faixas de comprimento de onda que a atmosfera terrestre corta tais como raios X e raios gama e algumas faixas de rádio. Além disso, colocar o telescópio acima da atmosfera permite visualizar o céu sem que as imagens sejam afetadas pela turbulência atmosférica, melhorando muito a qualidade dos resultados.

6. Observatórios astronômicos

Observatórios astronômicos são instalações que reúnem diversos telescópios em locais convenientes: os observatórios na faixa óptica são instalados no alto de montanhas e longe de aglomerações urbanas e os rádio-observatórios são instalados em vales ou em planícies para isolar tanto quanto possível as emissões de rádio artificiais. Estão sendo projetados para o futuro grandes telescópios ópticos com dezenas de metros de diâmetro que deverão revolucionar a astronomia nas próximas décadas.

2.3 A INFORMAÇÃO QUE NÃO CHEGA PELA LUZ

1. Material do Sistema Solar

Ainda que a maioria das informações sobre distintos corpos celestes seja obtida a partir da luz que eles emitem, existem outros portadores de informação disponíveis aos astrônomos. Os meteoritos por exemplo trazem até a Terra informação sobre a composição química primitiva do Sistema Solar. Sondas que viajam até outros planetas e satélites permitem a coleta e análise de informações sobre os mesmos.

2. Detectores de neutrinos

Os neutrinos são partículas subatômicas produzidas nos núcleos das estrelas durante o processo de fusão nuclear que produz a energia das mesmas. Estas partículas podem ser detectadas na Terra e trazem informação sobre o que ocorre no núcleo do Sol e das estrelas.

3. Detectores de raios cósmicos

A Terra é constantemente bombardeada por partículas que vêm de outros corpos celestes, que recebem o nome de *raios cósmicos* e consistem de prótons, elétrons, partículas alfa e outras. Elas variam muito em energia e sua origem é ainda controversa.

4. Detectores de ondas gravitacionais

De acordo com a Teoria da Relatividade, deformações no espaço-tempo devem se propagar no universo com a velocidade da luz, consistindo nas chamadas *ondas gravitacionais*. Ainda que jamais tenham sido detectadas, tais ondas deverão trazer informações totalmente distintas daquelas obtidas da radiação eletromagnética, que servirão tanto para entender processos astrofísicos como a formação de buracos negros, bem como para a validação de teorias fundamentais da física como a Relatividade Geral.

TESTES

ALTERNATIVA CORRETA

1. A luz se comporta com se fosse:

- a) Uma onda.
- b) Uma partícula.
- c) Simultaneamente onda e partícula.
- d) Uma vibração mecânica.

2. A radiação de corpo negro que qualquer corpo emite depende:

- a) De sua forma.
- b) De seu tamanho.
- c) De sua distância.
- d) De sua temperatura efetiva.

3. O céu é azul durante o dia porque:

- a) A maioria da radiação solar está nessa faixa de energia.
- b) A atmosfera da Terra espalha preferencialmente a luz azul.
- c) O azul se reflete nos oceanos e volta para a atmosfera.
- d) As moléculas do ar emitem cor azul.

4. Nos telescópios refletores a captação da luz é feita:

- a) Por uma lente denominada objetiva.
- b) Por uma lente denominada ocular.
- c) Por um espelho côncavo.
- d) Por um espelho plano.

5. Nos refletores com óptica Cassegrain:

- a) A luz atravessa um orifício no centro do espelho primário antes de chegar ao foco.
- b) A luz é captada pela lente objetiva.
- c) Existe uma lente corretora de campo antes do espelho primário.
- d) A ocular fica no extremo superior do tubo.

6. Acompanhamento sideral de um telescópio consiste:

- a) Na eficiência dos espelhos ou lentes do telescópio.
- b) Na possibilidade do mesmo observar objetos muito fracos.

- c) No fato da luz ser captada por um espelho côncavo ou por uma lente.
- d) No movimento do telescópio para compensar a rotação da Terra.

7. A fotografia de corpos celestes:

- a) Já era feita por Galileu no século 17.
- b) Surgiu em meados do século 19.
- c) É feita desde o final da Segunda Guerra Mundial.
- d) Só pode ser feita a partir dos anos 1980.

8. Os CCDs:

- a) São muito mais eficientes que os antigos filmes fotográficos.
- b) Têm resolução melhor que a dos filmes.
- c) Permitem a análise, transmissão e o armazenamento das informações por via eletrônica.
- d) Todas as alternativas estão corretas.

9. Os telescópios no espaço:

- a) Não podem ser controlados e observam os alvos ao azar.
- b) Possibilitam a obtenção de melhores imagens do que aquelas obtidas do solo.
- c) Operam apenas nas faixas de raios X e raios gama.
- d) Estão em fase de desativação.

10. Observatórios astronômicos na faixa óptica:

- a) Devem ser instalados no mínimo a dois mil metros acima do nível do mar.
- b) São instalados sempre em vales ou planícies.
- c) Não podem ter mais de um telescópio.
- d) Não podem ser instalados em ilhas oceânicas.

11. Entre os portadores de informação sobre outros corpos celestes estão:

- a) Sondas que coletaram material de Júpiter e trouxeram-no para a Terra.
- b) Materiais transportados de outras estrelas.
- c) Meteoritos que caem na Terra.
- d) Asteroides que já foram visitados por astronautas.

12. As sondas que pousaram em Marte:

- a) Coletaram material para análise, que foi feita lá mesmo.
- b) Nunca conseguiram transmitir informações para a Terra.
- c) Funcionaram apenas por poucos dias e deixaram de operar.
- d) Logo que pousaram, provaram a existência de vida naquele planeta.

13. Os detectores de raios cósmicos:

- a) São colocados nos fundos de minas ou em túneis.
- b) Necessitam ser espalhados por grandes áreas.
- c) São os radiotelescópios.
- d) Só existem no hemisfério norte.

14. Os detectores de ondas gravitacionais:

- a) Estão em operação há vários anos.

- b) Provaram que a Teoria da Relatividade Geral não é sempre válida.
- c) Existem apenas no papel, nunca foram construídos na prática.
- d) Visam detectar perturbações gravitacionais causadas pelo deslocamento rápido de grandes massas.

VERDADEIRO OU FALSO?

- A luz é uma onda eletromagnética como as ondas de rádio e os raios X ().
- Ondas de rádio são uma faixa de alta energia da radiação eletromagnética ().
- O arco-íris é uma demonstração natural de como a luz branca se compõe de distintas cores ().
- É impossível obter a composição química de uma estrela ().
- Um sólido ou líquido quando aquecidos emitem energia em todos os comprimentos de onda ().
- A atmosfera da Terra não deixa passar os raios X que chegam de fora ().
- Telescópios profissionais modernos são todos refletores ().
- O diâmetro de um telescópio é chamado de abertura ().
- Magnificação é como se denomina a distância focal de um telescópio ().
- Nos telescópios newtonianos a ocular é próxima do extremo superior do tubo, o que dificulta a instalação de instrumentos pesados ().
- Nos telescópios catadióptricos não existem espelhos, apenas lentes ().
- É possível construir telescópios refratores de qualquer diâmetro ().
- Numa montagem equatorial, basta um único motor com velocidade constante para compensar a rotação da Terra ().
- Telescópios com montagem altazimutal são maiores e de montagem mais complexa e mais cara ().
- Radiotelescópios permitem medir a radiação eletromagnética desde a faixa das ondas milimétricas até comprimentos de onda de dezenas de metros ().
- Radiotelescópios podem ter centenas de metros de diâmetro ().
- Com radiotelescópios é impossível observar pequenos detalhes de objetos celestes como com os telescópios ópticos ().
- Não é possível a instalação de telescópios ópticos no espaço ().
- Observações no infravermelho requerem telescópios instalados muito acima do nível do mar ().
- O Brasil é sócio de consórcios de telescópios que estão instalados no Chile ().
- Existem atualmente em projeto telescópios na faixa dos 30-40 metros de diâmetro ().
- É impossível coletar informações indo diretamente a outros corpos celestes ().
- Meteoritos trazem informação sobre a composição química do Sol ().
- O mais antigo material do sistema solar já recuperado está em um meteorito ().
- Astronautas trouxeram para análise na Terra o material coletado na Lua ().
- Nunca foi possível analisar material coletado em Marte ().
- Já houve uma sonda que colheu material de um cometa e trouxe para a Terra ().
- Neutrinos são produzidos em abundância na superfície do Sol ().
- Devido à sua grande quantidade, é fácil detectar neutrinos ().
- Todos os raios cósmicos são emitidos pelo Sol ().
- A detecção de ondas gravitacionais permitirá validar teorias físicas fundamentais ().
- Até agora, nunca uma onda gravitacional foi efetivamente detectada ().

RESPOSTAS

Alternativa correta: 1 (c); 2 (d); 3 (b); 4 (c); 5 (a); 6 (d); 7 (b); 8 (d); 9 (b); 10 (a); 11 (c); 12 (a); 13 (b); 14 (d).

Falso ou Verdadeiro: 1 (V); 2 (F); 3 (V); 4 (F); 5 (V); 6 (V); 7 (V); 8 (V); 9 (F); 10 (V); 11 (F); 12 (F); 13 (V); 14 (F); 15 (V); 16 (V); 17 (F); 18 (F); 19 (V); 20 (V); 21 (V); 22 (F); 23 (F); 24 (V); 25 (V); 26 (F); 27 (V); 28 (F); 29 (F); 30 (F); 31 (V); 32 (V).

CAPÍTULO 3 - MOVIMENTO APARENTE DO CÉU

Enos Picazzio

OBJETIVOS

Este capítulo trata essencialmente do movimento aparente dos corpos celestes, decorrente dos movimentos relativos da Terra. Para tanto, se explica o conceito de esfera celeste, a divisão do céu em constelações e as convenções de medidas angulares que ajudam a localizar os objetos no céu. Os movimentos do Sol, da Lua, dos planetas e das estrelas são discutidos, assim como a divisão do tempo em dia, mês a ano. Por fim, discute-se os sistemas de coordenadas celestes mais usuais.

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

ESFERA CELESTE

Esfera celeste é uma esfera imaginária de raio indefinido, centrada na Terra. A abóboda celeste vista de um lugar qualquer sobre a Terra é parte da esfera celeste. Todos os objetos visíveis têm sua projeção nessa esfera. Portanto, suas posições relativas são aparentes. Suas posições verdadeiras dependem das distâncias em que eles se encontram da Terra.

Os polos celestes são as projeções dos polos geográficos na esfera celeste. O equador celeste é a projeção do equador terrestre na esfera celeste. Como a Terra gira sobre seu eixo no sentido de oeste para leste, quando vista sobre do celeste norte, a esfera celeste parece girar de leste para oeste. Esse é o movimento diário do céu. As estrelas nascem no lado leste e se põem no lado oeste.

CONSTELAÇÕES

São regiões da esfera celeste, com tamanho e formatos diferentes. Há 88 constelações, associadas a figuras geométricas (Triângulo, Cruz, etc.), animais (Lobo, Corvo, etc.) ou divindades mitológicas (Centauro, Cassiopeia, etc.).

A associação aparente entre as estrelas de uma constelação é chamada "asterismo". Objetos com movimentos aparentes mais rápidos, como planetas, asteroides e cometas não se mantêm fixos às constelações, mas passam por elas em seus trajetos.

Os nomes das constelações são designados em latim e suas estrelas são designadas por letras do alfabeto grego, em ordem decrescente de brilho: α Cruz é a estrela mais brilhante da constelação da Cruz (Cruzeiro do Sul), β Cruz é a segunda estrela mais brilhante; e assim por diante. Geralmente, as estrelas mais brilhantes têm ainda nomes próprios: Sirius (α CMa), Betelgeuse (α Ori), etc.

Zodíaco é a faixa do céu onde estão localizadas as treze constelações mais populares: Carneiro, Touro, Gêmeos, Caranguejo, Leão, Virgem, Balança, Escorpião, Sagitário, Serpentário, Capricórnio, Aquário e Peixes. Por elas se deslocam os planetas e o Sol aparente.

ESTRELAS CIRCUMPOLARES

São as estrelas que se localizam dentro da calota circumpolar. Essas estrelas jamais se põem abaixo do horizonte. O centro da calota circumpolar é o polo celeste visível e o seu raio é determinado pela latitude. Para observadores situados sobre o equador terrestre (latitude zero), não há calota circumpolar.

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

MEDIDAS ANGULARES

A separação aparente entre os astros na esfera celeste é sempre medida em ângulos. Da mesma maneira, pode-se avaliar o tamanho aparente de um objeto. Os diâmetros aparentes médios da Lua e do Sol são iguais e equivalem a 0,5 grau.

MOVIMENTO DIURNO

Dia astronômico é o período decorrido entre duas passagens sucessivas de um ponto celeste pelo meridiano local (arco que liga o norte e o sul geográficos e passa pela vertical do local). Esse período é composto de um período claro (diurno) e um período escuro (noturno). A duração do período diurno não é necessariamente igual ao noturno e ambos variam ao longo do ano de acordo com as estações sazonais. A presença da atmosfera impede a mudança brusca entre os períodos noturno e diurno, e vice versa. Este fenômeno é conhecido por crepúsculo. Na Lua não há atmosfera, por isso não há crepúsculo.

MOVIMENTO APARENTE DO SOL

O movimento é dito aparente porque é a Terra que se move em torno do Sol, não o contrário. Todos os dias o Sol surge acima do horizonte no lado leste, cruza o céu em trajetória na forma de arco, atinge uma altitude máxima ao meio-dia, e põe-se abaixo do horizonte no lado oeste.

No verão a altura máxima do Sol em relação ao horizonte ocorre na data em que se inicia o verão. No início do inverno, ocorre a altura mínima. Essa altura se mede quando o Sol cruza o meridiano local. Pelo ciclo das sombras de um gnômon (qualquer haste vertical) pode-se verificar as épocas das estações sazonais. O comprimento da sombra do meio-dia varia ao longo de um ano. No solstício de verão (por volta de 21 de dezembro) a sombra é mínima porque o Sol atinge sua altura máxima. No solstício de inverno (por volta de 21 de junho) a sombra é máxima, pois o Sol atinge sua altura mínima ao cruzar o meridiano local. Entre estas datas ocorrem o equinócio de primavera (por volta de 21 de setembro) e o equinócio de outono (por volta de 21 de março).

O Sol só nasce no ponto cardeal leste e se põe no ponto cardeal oeste nos equinócios. Nesses dias a duração do período diurno e noturno se equivale. Fora dessas datas, o Sol nasce cada vez mais a nordeste, após o equinócio de outono, e cada vez mais a sudeste, após o equinócio de primavera. Observadores que estejam próximos aos polos geográficos vivem períodos longos de escuridão no inverno, quando o Sol jamais emerge no horizonte, e de claridade no verão, em que o Sol jamais se põe.

MOVIMENTO DA LUA

As fases lunares ocorrem por conta das posições relativas entre Terra, Lua e Sol. A face lunar voltada para o Sol é sempre iluminada. Já a face voltada para a Terra, não. As fases cheia e nova ocorrem quando a Lua alinha-se com a Terra e o Sol. Quando a Lua está entre os dois (0° do Sol), a fase é nova. Neste caso podem ocorrer eclipses solares. Se for a Terra que estiver entre Lua e Sol (180° do Sol), a fase será cheia e os possíveis eclipses serão lunares. Quando a distância angular da Lua ao Sol for 90° à leste, a fase é quarto crescente. Se for 90° à oeste (ou 270° do Sol), a fase é quarto minguante. Entre 0° e 180° as fases são crescentes. Entre 180° e 360° as fases são minguantes.

ECLIPSES

Os eclipses ocorrem quando a Lua bloqueia a luz solar (eclipse solar) ou quando ela passa pelo cone de sombra da Terra (eclipse lunar). Como os diâmetros aparentes da Lua e do Sol variam, os eclipses solares não têm a mesma duração. Se o diâmetro aparente da Lua for menor que o do Sol, o eclipse pode ser anular. O eclipse solar é parcial quando apenas parte do Sol é encoberto pela Lua. O eclipse lunar é parcial quando apenas parte da Lua penetra a umbra (cone de sombra da Terra).

Um eclipse solar total jamais ultrapassa 7 minutos e 30 segundos. Já um eclipse lunar total pode durar até 1 hora e 40 minutos. A cada 18 anos, 10 ou 11 dias (dependendo dos anos bissextos no intervalo) e 8 horas (ou 6585,65 dias) os eclipses ocorrem novamente na mesma ordem, pois Sol, Terra e Lua retornam aproximadamente às mesmas posições relativas. Esse é o ciclo de Saros. Em cada ciclo ocorrem 70 eclipses, 41 solares e 29 lunares. Em um ano ocorrem de dois a cinco eclipses solares (no máximo, dois totais) e até três lunares. A razão para isso é que a órbita da Lua não é fixa, ela gira gradualmente sobre seu centro em um período de 18,6 anos, também chamado período de regressão dos nodos.

MOVIMENTO APARENTE DAS ESTRELAS (OU DA ESFERA CELESTE)

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

Para um observador situado exatamente sobre o equador terrestre o movimento diurno se dá segundo trajetórias perpendiculares ao horizonte local. Se o observador estiver exatamente sobre um dos polos terrestres, norte ou sul, ele verá o movimento diurno se processando segundo trajetórias circulares paralelas ao horizonte local. O zênite do observador coincidirá com o polo celeste visível. Nesse caso não haverá nascente ou poente porque todos os astros que estiverem acima do horizonte, assim permanecerão durante uma volta completa da esfera celeste. Fora dessas posições particulares, equador ou polos, o movimento diurno se faz segundo arcos inclinados para o sul, se o observador estiver no hemisfério norte, ou para o norte, se o observador estiver no hemisfério sul. Os arcos do movimento diurno estão inclinados relativamente ao zênite de um ângulo idêntico ao da latitude local.

TEMPO

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

A duração do dia astronômico é o período de tempo decorrido entre duas passagens sucessivas de um objeto celeste pelo meridiano local. Se o objeto for uma estrela, o dia é chamado sideral e tem duração exata de 23h 56m 04,09s. Se o objeto celeste for o Sol, o dia é chamado solar (medido pelo relógio solar). O tempo decorrido entre duas passagens sucessivas do Sol pelo meridiano local é chamado dia solar verdadeiro (ou dia solar aparente). Por decorrência da variação da velocidade orbital da Terra, o dia solar verdadeiro varia entre 23h e 45m e 24h e 15m. A média anual dos dias solares verdadeiros é chamada dia solar médio, valendo exatamente 24 horas.

Sendo o dia sideral mais curto que o dia solar médio, a cada dia as estrelas nascem 3m e 55,91s mais cedo, quando observadas em noites consecutivas e nas mesmas condições. Após um ano, os dois instantes (sideral e solar) voltam a se igualar. A diferença entre o dia solar verdadeiro e o dia solar médio é calculada pela equação do tempo ($ET = T_m - T_o$).

HORA LOCAL, FUSO HORÁRIO E LINHA INTERNACIONAL DE DATA

A hora solar aparente é determinada pela passagem do Sol pelo meridiano superior (acima) do lugar. Seu valor pode variar em até cerca de 15 minutos, para mais ou para menos, em relação ao valor médio anual (24 horas). Cada hora corresponde a 15° ($360^\circ/24h$). Esses intervalos são denominados fusos horários.

O fuso referencial para a determinação das horas é o do Observatório de Greenwich, cujo centro (meridiano superior) é padronizado como 0° . A hora determinada pelo fuso de Greenwich recebe o nome de Tempo Universal (UT), que substitui o Tempo Médio de Greenwich (GMT). Atualmente, o padrão de tempo do UT é determinado por relógios atômicos e não mais pela observação astronômica. O meridiano inferior de Greenwich determina a Linha Internacional da Data. Ao ser cruzada de oeste para leste, subtrai-se um dia na data. Se for cruzada no sentido contrário, acrescenta-se um dia na data.

Os fusos horários estão centrados nos meridianos das longitudes. Porém, as formas dos fusos horários podem ser irregulares devido às fronteiras dos países, a questões políticas ou mesmo financeiras.

A hora legal de um local é determinada a partir da UT. A oeste de Greenwich subtrai-se os fusos existentes entre Greenwich e o local. A hora legal no extremo leste brasileiro é a de Fernando de Noronha (UT - 2 horas) e a do extremo oeste é o do Acre (UT - 5 horas). A maior parte do território brasileiro segue o fuso de Brasília (UT - 3 horas).

MÊS SINÓDICO E MÊS SIDERAL

O mês é determinado pelo movimento da Lua. Mês sideral é o período orbital da Lua, com duração de 27,321662 dias (27d 7h 43m 12s). Mês sinódico é o mês das lunações ou das fases da Lua, ou seja, é o tempo decorrido entre duas fases sucessivas (Nova-Nova, Cheia-Cheia, etc.), e tem duração de 29,530589 dias (29d 12h 44m 3s). Eles são diferentes porque a Terra avança em sua órbita em média $0,99^\circ$ por dia. Portanto, em um mês sideral a Terra deslocou-se quase 27° em relação à posição anterior e a repetição da fase lunar esperada só ocorrerá 2,208927 dias mais tarde.

ANO SIDERAL E ANO TRÓPICO

Ano é o tempo decorrido durante uma volta completa da Terra ao redor do Sol. O ano sideral é o período de revolução da Terra e equivale a 365,256363 dias (365d 6h 9m 10s). O ano

trópico é o tempo decorrido entre duas estações sucessivas e dura 365,242191 dias (365d 5h 48m 45s). A rigor ele representa o tempo decorrido entre duas passagens sucessivas do Sol aparente pelo equinócio do outono. A diferença entre o ano sideral e o ano trópico é decorrente da precessão do eixo de rotação da Terra, que provoca a precessão dos equinócios.

SISTEMAS DE COORDENADAS

Coordenadas geográficas

São as coordenadas utilizadas na superfície da Terra. Latitude (f) é o ângulo medido sobre os meridianos: latitude norte, acima do equador terrestre, e latitude sul, abaixo do equador. A latitude varia entre 0 e 90° . Longitude (l) é o ângulo medido sobre o equador, tendo como referência o meridiano do Observatório de Greenwich (definido como longitude zero). A longitude varia entre 0° e 180° , medida a leste ou a oeste de Greenwich.

Coordenadas celestes

São medidas angulares feitas sobre a esfera celeste, a partir de planos referenciais. Neste capítulo abordaremos apenas os sistemas baseados no equador celeste ou no plano do horizonte do observador.

Coordenadas equatoriais

Este sistema de coordenadas celeste é bem parecido com o sistema geográfico. Ao ser expandido, o plano do equador terrestre cruza a esfera celeste e define o equador celeste. São duas suas coordenadas. Declinação (d) é a coordenada celeste medida sobre os meridianos. Da mesma forma que a latitude, ela também varia entre 0° (no equador celeste) e $+90^\circ$ (ao norte do equador) ou -90° (ao sul do equador). Ela também pode ser expressa como d N (entre 0 e $+90^\circ$) ou d S (entre 0 e -90°). A ascensão reta (a) é medida sobre o equador celeste, na direção leste e a partir do equinócio vernal (ponto g). Ela pode ser expressa em hora, minuto e segundo ou hora e fração, e varia entre 0 h e 24 h.

Este sistema de coordenadas é universal, pois independe do local do observador. Devido à precessão do eixo de rotação da Terra, essas coordenadas necessitam correção.

Coordenadas horizontais

O sistema de coordenadas horizontais é referenciado ao plano do horizonte do observador. A vertical desse local cruza a esfera celeste no zênite desse observador. O azimute (A) é medido sobre o horizonte local, partindo do norte geográfico e indo na direção do leste geográfico. O azimute é expresso em grau e fração. A altura (H) é medida sobre os meridianos, que são perpendiculares ao plano do horizonte local e cruzam o zênite. Ela é expressa em grau e fração e varia entre 0° e 90° . H é sempre positivo porque o observador não vê nada abaixo do seu horizonte. É fácil constatar que: $A(\text{Norte}) = 0$, $A(\text{Leste}) = 90^\circ$, $A(\text{Sul}) = 180^\circ$ e $A(\text{Oeste}) = 270^\circ$. Portanto, azimute é o ângulo subentendido entre o N e o meridiano que passa pelo astro.

As coordenadas horizontais de um astro variam conforme a posição do observador, portanto trata-se de um sistema particular.

Coordenadas horárias

Trata-se de um sistema referencial híbrido, baseado no equador celeste e no meridiano do observador. Suas coordenadas são declinação (d), da forma como é definida no sistema de coordenadas equatoriais, e ângulo horário (h), definido como a distância angular entre o meridiano local e o meridiano do astro, medido em hora (e fração), sobre o equador celeste e na direção do Oeste (ou no sentido horário, sobre o polo celeste norte).

Enquanto a ascensão reta de um astro é constante, o ângulo horário aumenta com a passagem do tempo. O ângulo horário do ponto g é chamado tempo sideral: $TS = h + a$. O valor de TS não deve superar 24h; quando isto acontecer, subtrai-se 24h.

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

TESTES

Escolha a alternativa correta.

01. Comparado com o dia solar verdadeiro, o dia sideral é:

- a) Menor.
- b) Maior.
- c) Igual, porque dia é dia.
- d) Pode ser maior ou menor, depende da época.
- e) Depende da latitude.

02. Quanto aos sistemas de coordenadas, pode-se afirmar que:

- a) O sistema equatorial é útil apenas para se tratar estrelas da Via Láctea.
- b) O sistema horizontal é o mesmo para qualquer observador na Terra.
- c) Zênite é um ponto do sistema de coordenadas horárias.
- d) A ascensão reta de um astro é constante.
- e) O sistema horário é útil para se tratar astros com movimento aparente maior que das estrelas.

03. O azimute (A) de um astro é medido:

- a) No sentido do Sul em direção à Leste.
- b) No sentido do Norte em direção à Leste.
- c) No sentido do Sul em direção à Oeste.
- d) No sentido do Norte em direção à Oeste.
- e) É uma grandeza constante e independe da direção tomada.

04. Em relação ao movimento aparente, os planetas:

- a) A quantidade de laçadas depende de sua distância a Terra.
- b) Se movem de oeste para leste, em oposição ao movimento das estrelas.
- c) Movem-se no mesmo sentido das estrelas.
- d) Fazem uma única laçada (loop) no céu, por ano.
- e) A quantidade de laçadas depende do tamanho do planeta.

05. A coordenada que mede a distância angular sobre o horizonte é:

- a) Declinação.
- b) Ascensão reta.
- c) Altitude.
- d) Longitude.
- e) Azimute.

06. Em relação ao horizonte, a altura do polo é igual a:

- a) Longitude do local.
- b) Latitude do local.
- c) Azimute.
- d) Declinação.
- e) Altitude do local.

07. O sistema de coordenadas equatorial é baseado no:

- a) Horizonte.
- b) Zênite.
- c) Meridiano celeste.
- d) Equador celeste.
- e) Meridiano de Greenwich.

08. Em seu movimento diurno, as estrelas movem-se em círculos:

- a) Perpendiculares ao horizonte.
- b) Paralelos ao horizonte.
- c) A orientação depende da latitude.
- d) Inclinados em relação ao horizonte.
- e) A orientação depende da longitude.

09. As constelações são:

- a) Famílias de astros.
- b) Estrelas de outras galáxias.
- c) Regiões do céu.
- d) Conjunto de astros de mesma natureza.
- e) Conjunto de astros na mesma distância.

10. O Sol nasce no ponto cardinal leste:

- a) Nos equinócios.
- b) Nos solstícios.
- c) Sempre.
- d) Apenas no equador.
- e) Apenas nos polos.

11. A calota polar:

- a) Tem tamanho angular equivalente ao dobro da latitude.
- b) Tem tamanho equivalente ao dobro da longitude.
- c) Só existe no equador.

- d) Só existe nos polos.
- e) É a região recoberta de gelo.

12. Assinale a afirmativa incorreta. O Sol:

- a) Passa duas vezes ao ano no equador.
- b) Passa pelo equador nos equinócios.
- c) Está sobre os trópicos nos solstícios.
- d) Está sobre os círculos polares nos solstícios.
- e) Jamais passa pelos círculos árticos.

Responda às seguintes questões:

13. O que é o movimento de precessão da Terra? Qual o seu efeito sobre o sistema de coordenadas equatoriais?

14. Explique o que são os equinócios e solstícios e suas respectivas datas. Correlacione com as estações do ano.

15. Por que Vênus é popularmente conhecida como estrela matutina ou estrela vespertina?

16. De que ponto da superfície terrestre um observador vê:

- a) Metade da esfera celeste.
- b) Toda a esfera celeste.
- c) As estrelas movendo-se paralelamente ao horizonte.
- d) As estrelas movendo-se perpendicularmente ao horizonte.

RESPOSTAS

01 (d), 02 (d), 03 (b), 04 (a), 05 (e), 06 (b), 07 (d), 08 (c), 09 (c), 10 (a), 11 (a), 12 (d).

13 (O aluno deve explicar a origem do movimento e que o mesmo precessiona o ponto vernal, ponto zero das medidas de declinação dos astros no sistema equatorial.)

14 (O aluno deve explicar que nos solstícios, temos os dias mais longos e curtos do ano e nos equinócios, a duração do dia é igual ao da noite. Correlacionar solstícios de verão e inverno; equinócios de primavera e outono.)

15 (Porque nunca se afasta do Sol mais que 47° , ora a oeste (objeto matutino), ora a leste (objeto vespertino).)

16 (a- qualquer, b- nenhum, c- polos, d- equador).

CAPÍTULO 4 - A TERRA

Enos Picazzio e Eder Cassola Molina

OBJETIVOS

Descrever a Terra como um planeta, discutindo a estrutura interna, superfície, atmosfera, campo magnético e sua interação com o Sol. Esta descrição isolada é fundamental para a compreensão da natureza dos demais planetas e corpos rochosos menores.

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A FORMA DA TERRA

Da superfície da Terra é difícil distinguir sua forma. Aclives, declives, depressões e montanhas complicam essa percepção. Observando a circularidade da sombra da Terra nos eclipses lunares, Aristóteles deduziu que o formato do planeta deveria ser esférico. Ele também se deu conta que o aspecto do céu muda, conforme a latitude do observador, por conta dessa esfericidade.

Uma avaliação mais acurada das circunferências polar e equatorial mostra que a Terra não é, de fato, uma esfera. Se fosse comparada a um elipsoide (um sólido que resulta da rotação de uma elipse em torno de um dos seus eixos), o eixo maior (12.756,3 km) estaria no plano do equador e o menor (12.713,5 km) coincidiria com o eixo de rotação.

O PORTE DA TERRA

A primeira estimativa mais precisa foi feita por Eratóstenes, de Alexandria. Ele argumentava que se a Terra fosse esférica, a incidência dos raios solares em um mesmo instante ocorreria em inclinações que dependiam da latitude.

Ao meio-dia do solstício de verão a luz incidia exatamente na vertical da cidade de Siena (atual Assuã), a 800 km ao sul de Alexandria. Nessa mesma data, Eratóstenes mediu o ângulo de incidência da luz utilizando um obelisco em Alexandria. Com o ângulo de incidência e a altura do obelisco e a distância entre as duas cidades, Eratóstenes calculou o perímetro da circunferência da Terra em aproximadamente 40.000 km. Os valores atuais dos perímetros das circunferências polar e equatorial da Terra são, respectivamente, de 39.940,6 km e 40.075,1 km.

A MASSA DA TERRA

Os elementos químicos mais leves são os gases atmosféricos e os mais pesados são os materiais metálicos do núcleo. Pode-se considerar as rochas como material predominante, mas

ainda assim há variação significativa de densidade entre os vários tipos de rochas. Adotando um valor médio de densidade em torno de $2,7 \text{ g/cm}^3$ ou 2.700 kg/m^3 , calculando o volume de uma esfera de diâmetro 12.735 km, e multiplicando aquele por este, obteremos aproximadamente $M = 3,0 \times 10^{24} \text{ kg}$, já convertendo os valores em kg e m.

A massa da Terra só pôde ser estimada com precisão maior após a descoberta da lei da gravitação universal exposta em 1687 por Isaac Newton. Em 1798, Henry Cavendish utilizou a lei da gravitação universal para calcular massa e densidade da Terra e chegou aos valores $6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$ e $5,48 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Esta densidade é maior que a das rochas da superfície terrestre, porém menor que as do manto e do núcleo do planeta.

O INTERIOR DA TERRA

A estrutura interna da Terra é investigada por métodos geofísicos que investigam as diferentes propriedades físico-químicas das rochas de forma indireta, por exemplo, através dos sismos. Assim, é possível dividir a Terra em três componentes básicos: crosta, manto e núcleo.

A crosta é a camada superficial, rígida, ao menos em comparação às demais. Sob os continentes a crosta tem espessura média de 35 km e densidade que varia entre 2,6 e 2,8 g/cm^3 . Sob os oceanos a espessura reduz-se a 6 km e a densidade varia de 3,0 a 3,3 g/cm^3 .

O manto é constituído de minerais compostos de silício e oxigênio, ricos em ferro e magnésio. Ele é sólido, mas comporta-se como um fluido muito viscoso (difícil de fluir) para grandes esforços e intervalos de tempos da ordem de milhares a milhões de anos. A densidade do manto varia entre 3,5 g/cm^3 e 5,5 g/cm^3 .

O manto pode ser subdividido em duas camadas: o manto superior (que vai da base da crosta até 400 km de profundidade) e o manto inferior (que vai de 400 km a 2.900 km de profundidade). Entre essas duas camadas há uma zona de transição (manto transicional), entre 400 e 650 km, de propriedades intermediárias.

O núcleo começa em 2.900 km de profundidade e vai até o centro da Terra (6.370 km, em média). Ele é composto de duas camadas denominadas núcleo externo e núcleo interno. A porção externa é fluida e vai até 5.100 km de profundidade, composta essencialmente de ferro e níquel, com pequenas quantidades de silício, oxigênio e enxofre. O núcleo interno é sólido e formado basicamente por ferro e níquel.

Outra maneira possível de dividir a Terra em camadas é levar em consideração as características de rigidez e fluxo de material. Nessa divisão, a litosfera (“esfera de pedra”) é a camada rígida mais externa, que vai da superfície ao ponto onde a temperatura atinge os 1.250 °C. A litosfera inclui a crosta e a parte superior do manto e tem mobilidade.

A astenosfera (“esfera frágil”) atinge aproximadamente 700 km de profundidade. Ela se comporta como um fluido viscoso para grandes esforços atuantes em longos períodos (escala de milhões de anos), e como um sólido elástico para eventos de curta duração.

A mesosfera (“esfera do meio”) se estende de 700 km até 2.900 km de profundidade. Ela está submetida a pressões maiores do que as camadas anteriores, o que inibe os movimentos de convecção.

A SUPERFÍCIE DA TERRA

Embora formada por rochas, a superfície terrestre não é uma camada monolítica e estática. Ela é composta de grandes blocos denominados placas litosféricas. O movimento relativo entre as placas, provocado pelos movimentos do fluido abaixo delas, provocam terremotos e

eventualmente vulcanismo. Esses movimentos relativos permitem definir três tipos de margem de placa: margens de convergência, divergência e transcorrência.

Na convergência a colisão é frontal. As placas sobrepõem-se e uma delas afunda (subducção). A placa que mergulha é lentamente destruída (fundida) com a profundidade. A borda da outra placa é elevada e forma montanhas. Esse choque também produz terremotos e vulcanismo.

Na divergência as placas se afastam e dão vazão ao material proveniente da astenosfera que se solidifica ao longo das bordas das placas e se incorpora a elas. Nessa região ocorrem sismos de menor magnitude.

Na transcorrência o movimento é lateral, sem criação ou destruição de placa. Nessas regiões também ocorrem numerosos terremotos.

TECTÔNICA DE PLACAS

O cartógrafo alemão Abraham Ortelius foi o primeiro a notar as similaridades das linhas de costa da América do Sul e da África Ocidental. Quase três séculos depois, Alfred Wegener elaborou a teoria da deriva continental, propondo que há 200 milhões de anos todas as massas continentais formavam um bloco único, a Pangea. Posteriormente, a Pangea teria se fragmentado, dando origem aos continentes e oceanos atuais.

Atualmente sabemos que o processo de fragmentação e deslocamento iniciou-se há cerca de 230 milhões de anos e continua ativo. Inicialmente, a Pangea dividiu-se em dois grandes supercontinentes: Laurásia e Gondwana.

Estudos das rochas do fundo oceânico da região nordeste do Pacífico levaram ao surgimento de uma teoria mais sofisticada, a Tectônica de Placas, ou Tectônica Global. Nesta concepção, as placas litosféricas afastam-se nas margens de divergência e colidem nas zonas de convergência. As bordas das placas podem ser facilmente delineadas observando-se a distribuição de terremotos, que normalmente ocorrem nestas regiões.

No movimento relativo entre as placas, normalmente da ordem de centímetros por ano, as tensões se acumulam em diferentes pontos até atingir o limite de resistência das rochas locais e provocar rupturas. O movimento repentino produzido pela ruptura libera energia sob a forma de vibrações que se propagam em todas as direções. O ponto onde ocorreu a ruptura é chamado foco ou hipocentro. A projeção desse ponto na superfície ao longo da vertical é denominada epicentro.

A intensidade de um terremoto é determinada a partir dos seus efeitos. A escala de intensidades mais utilizada é a de Mercalli Modificada, com 12 graus. Já a magnitude está associada à energia total liberada pelo sismo. A escala de magnitude mais famosa é a proposta por Charles F. Richter. Cada incremento de um ponto na escala Richter corresponde a um aumento de dez vezes na amplitude da vibração, e de mais de trinta vezes na energia liberada. Terremotos com grande poder de destruição quase sempre têm magnitude superior a 7.

Normalmente os sismos ocorrem ao longo dos limites das placas litosféricas. No interior das placas também ocorrem tremores, chamados sismos intraplaca. Esse tipo de sismo ocorre em pequenas profundidades e com magnitudes relativamente pequenas se comparadas com a sismicidade existente nas bordas das placas.

Nas bordas de divergência o material situado abaixo da placa litosférica ascende à superfície na forma de magma. Já nas bordas de convergência, se ao menos uma das placas envolvidas for oceânica, normalmente temos vulcanismo. Quando atinge a superfície, o magma libera a parte volátil para a água ou atmosfera, extravasa na forma de lava e se resfria, cristalizando-se para formar rochas vulcânicas.

As erupções mais violentas são explosivas e liberam gases e cinzas vulcânicas capazes de formar nuvens com dezenas de quilômetros de altura. Essas erupções, tidas como um dos tipos mais poderosos e destruidores, produzem com frequência fluxos piroclásticos (nuvens de cinza vulcânica e gás aquecido podem deslocar-se à velocidade de até 160 km/h).

MAGNETISMO TERRESTRE

O campo magnético terrestre é gerado pela movimentação relativa entre as partes líquida e sólida do seu núcleo metálico. Esse campo é atenuado pelo manto, composto essencialmente de material eletricamente isolante, mas estende-se para além da superfície terrestre.

Na realidade, os polos norte e sul magnéticos são invertidos em relação aos polos norte e sul geográficos. Por convenção as polaridades se tornaram coincidentes: os polos norte ficam no hemisfério norte e os polos sul ficam no hemisfério sul. As coincidências, no entanto, não valem para as posições físicas. Embora mudem de posição lentamente, os polos magnéticos ficam a cerca de 1.600 km dos polos geográficos que determinam o eixo de rotação da Terra.

O campo magnético que envolve a Terra é o responsável pela magnetosfera. Na direção do Sol a extensão da magnetosfera não ultrapassa 10 raios terrestres, mas na direção oposta ela pode atingir centenas de raios terrestres.

A magnetosfera atua como um escudo para a biosfera, protegendo-a dos efeitos danosos do vento solar. Ela está carregada de partículas elétricas, que espiralam num movimento de vai-e-vem entre os polos magnéticos norte e sul.

Há dois cinturões circundando a Terra, conhecidos por Cinturões de radiação de Van Allen. Eles ficam em uma região compacta acima do equador, na altura aproximada de 6.300 km. O cinturão externo contém elétrons e íons de diferentes espécies, com energia menor que as do cinturão interno composto de prótons.

A incidência das partículas do vento solar na magnetosfera provoca luminescência na atmosfera nas regiões próximas aos polos, denominadas auroras polares. No norte é conhecida como Aurora Boreal; no sul é Aurora Austral.

ÁGUA: CICLO E AÇÃO GEOLÓGICA

A água é relativamente abundante no Sistema Solar, mas a Terra é o único local onde se encontra água líquida na superfície. Dos 510 milhões de km² da superfície terrestre, 310 milhões são cobertos por oceanos. Outros 189 milhões são de área continental, dos quais 2,5 milhões correspondem a rios e lagos e até 15 milhões são cobertos por geleiras. Em termos percentuais, cerca de 94% da água da Terra estão retidas nos oceanos, 2% nas geleiras e capas de gelo, 4% nas regiões subterrâneas, e menos que 0,01% em lagos, rios, pântanos, umidade do solo, biosfera e atmosfera.

A atmosfera e hidrosfera atuais são secundárias e não surgiram diretamente do processo de formação da Terra. A maior parte dos componentes fluidos foi produzida pela emissão de gases do manto, por vulcanismo e outros mecanismos indiretos, durante todo o tempo geológico. É possível que parte significativa da atmosfera e hidrosfera tenha origem extraterrestre. Corpos celestes ricos em água, como cometas e alguns tipos de asteroides, se chocaram com a Terra no passado remoto.

A água é um recurso renovável graças ao ciclo hidrológico. Durante o ciclo hidrológico a água evapora nos mares, rios e lagos, transpira na biosfera, forma nuvens atmosféricas, que se precipitam como chuvas, neve e granizos. Ao atingir o solo, parte dessa precipitação infiltra-

se, abastecendo aquíferos, os reservatórios subterrâneos mais profundos, enquanto parte escoava para rios, lagos, mares e oceanos. O ciclo hidrológico é complexo, pois envolve desde fatores meteorológicos (vento, chuva, insolação) a ações antrópicas (produzidas pelo homem), que, além de modificar a paisagem, provoca efeitos que afetam o clima.

A água subterrânea participa de um conjunto de processos geológicos que modificam os materiais terrestres, transformando minerais, rochas e paisagens. O movimento conjunto da água subterrânea e superficial é o agente mais ativo na escultura da superfície terrestre. Os principais processos dessa ação são intemperismo químico (pedogênese), escoamento de solo alagado (solifluxão), erosão interna (solapamento) e dissolução (carstificação).

CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA

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

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

Essencialmente, a atmosfera terrestre é composta de nitrogênio (78%), oxigênio (21%), argônio (1%), espécies gasosas menos abundantes, além de partículas sólidas e aerossóis (partículas líquidas).

A camada mais baixa é a troposfera, que concentra cerca de 75% da massa atmosférica e estende-se até aproximadamente 12 km. Nela ocorrem praticamente todos os fenômenos da dinâmica externa do planeta (nuvens, ventos, chuvas e raios, entre outros processos). Temperatura e pressão variam localmente, mas diminuem com a altura.

A próxima camada é a estratosfera, que vai até 50 km de altura. A temperatura local aumenta com a altura. É na estratosfera que o ozônio se concentra em uma camada que absorve a radiação ultravioleta do Sol. A difusão da luz solar na estratosfera é responsável pela cor azulada do céu.

A mesosfera, que está acima da estratosfera, estende-se até cerca de 85 km. Nela a temperatura volta a cair com a altura, por isso é uma camada extremamente fria (chega a -100°C).

Acima da mesosfera, e até 500 km, tem-se a termosfera. Nessa região a temperatura aumenta com a altitude, podendo atingir 1.000°C . As elevadas temperaturas são causadas pela intensidade da radiação solar. A termosfera é rica em elétrons livres, por isso é aqui que fica a ionosfera (responsável pela reflexão das ondas de rádio utilizadas em comunicação de solo. As auroras formam-se na termosfera).

A última camada é a exosfera, que pode atingir a altura de 1.000 km. As espécies químicas que chegam a esta altura perdem-se no espaço. Na exosfera circulam os satélites artificiais.

CIRCULAÇÃO E ZONAS CLIMÁTICAS

A potência de radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre corresponde a 343 W/m^2 ou cerca de meia caloria por metro quadrado por minuto. Desse total, cerca de 243 W/m^2 é absorvido pela atmosfera, provocando uma estufa (aquecimento) de 31°C , aproximadamente. O restante é refletido de volta ao espaço.

A intensidade da radiação que atinge a superfície da Terra é máxima no equador e mínima nos polos. Quanto maior a latitude, menor é o ângulo de incidência relativamente ao horizonte local.

O processo de transferência de calor entre baixas e altas latitudes ocorre através dos sistemas de circulação atmosférica e oceânica. Os movimentos verticais são devidos basicamente à diferença de temperatura e os horizontais ocorrem, sobretudo por influência da rotação da Terra.

A região entre os trópicos de Câncer e Capricórnio é denominada zona tropical. As regiões entre os trópicos e os círculos polares são as zonas temperadas. As zonas polares situam-se no interior dos círculos polares.

O contraste de temperatura entre os polos e o equador cria uma circulação térmica semelhante à da brisa marítima. Na zona tropical, a circulação se dirige para o equador na superfície e para os polos em nível superior, formando uma célula de Hadley em cada hemisfério. O vento que se dirige para o equador é desviado para oeste pela força de Coriolis, formando os ventos alísios. No hemisfério norte, os alísios vêm de nordeste, e no hemisfério sul, de sudeste. Eles se encontram próximo ao equador, e formam uma zona de baixa pressão equatorial.

TESTES

Questões:

1. Qual é a forma da Terra?
2. Os terremotos ocorrem igualmente em toda a superfície terrestre? Explique.
3. Ocorrem terremotos no Brasil?
4. Quais as principais camadas da Terra?
5. Crosta e litosfera são a mesma coisa?
6. O campo magnético terrestre é gerado pela presença de rochas magnéticas na superfície?
7. Os vulcões distribuem-se de maneira uniforme pela superfície terrestre?
8. Os continentes e oceanos mantêm sua configuração desde que a superfície da Terra se solidificou?
9. A teoria da Deriva Continental e a Teoria da Tectônica de Placas são equivalentes?
10. Como a determinação da densidade média da Terra auxiliou no entendimento preliminar do interior do planeta?
11. O que é a troposfera?

Assinale a alternativa correta.

1. A intensidade de um terremoto:

- a) Mede seus efeitos na superfície.
- b) Mede o número de sismógrafos que o detectaram.
- c) Quantifica a energia liberada pelo sismo.
- d) Fornece informações sobre o interior da Terra.

2. A camada líquida metálica que se encontra no interior terrestre é:

- a) A crosta.
- b) O manto.
- c) O núcleo externo.
- d) O núcleo interno.

3. A camada mais superficial da atmosfera, onde ocorrem os principais fenômenos atmosféricos, como chuvas, nuvens, ventos, é a:

- a) Astenosfera.
- b) Troposfera.
- c) Mesosfera.
- d) Litosfera.

4. Adão tinha umbigo?

- a) Sim, tinha um bigo.
- b) Não, tinha dois bigos.
- c) Não tinha um bigo mas tinha bagos.
- d) Tinha um bigo e dois bagos.

5. Os terremotos ocorrem principalmente:

- a) Na região central das placas litosféricas.
- b) Nas bordas das placas litosféricas.
- c) No interior dos vulcões.
- d) Nos oceanos.

6. O campo magnético terrestre é gerado:

- a) Por rochas magnetizadas presentes na crosta.
- b) Por material magnetizado do manto.
- c) Pela interação entre o núcleo externo e o núcleo interno.
- d) Pela interação entre a crosta e o núcleo externo.

7. O local onde foi liberada a energia durante a ocorrência de um terremoto é chamado de:

- a) Epicentro ou origem.
- b) Distância epicentral
- c) Hipocentro ou foco.
- d) Intensidade ou magnitude.

8. A magnitude de um terremoto:

- a) Está relacionada com a energia liberada pelo sismo.

- b) Está relacionada com o número de estações que detectaram o sismo.
- c) Está relacionada com a profundidade do sismo.
- d) Está relacionada com a distância do sismo à estação que o detectou.

9. A respeito do manto terrestre, é correto afirmar que:

- a) É sólido, mas comporta-se como fluido no tempo geológico.
- b) É fluido, mas comporta-se como sólido no tempo geológico.
- c) É fluido tanto para curtos quanto para longos intervalos de tempo.
- d) É sólido tanto para curtos quanto para longos intervalos de tempo.

RESPOSTAS:

Questões:

1. A Terra apresenta forma irregular, com montanhas, vales, planícies e planaltos que não permitem definir sua forma como uma figura simples. Como aproximação, porém, a Terra pode ser entendida como esférica, ou como um elipsoide de revolução com achatamento muito pequeno (da ordem de 1/300).

2. Não, os terremotos tendem a concentrar-se em faixas estreitas ao longo do planeta. Estas faixas são zonas de fraqueza da camada rígida da Terra (a litosfera), e os terremotos ajudam a defini-las.

3. Sim, ocorrem pequenos abalos sísmicos do Brasil, de pequena magnitude, normalmente associados a estruturas locais superficiais. Não temos uma sismicidade elevada no Brasil pois nosso país encontra-se no interior de uma placa litosférica, e não na borda de uma placa, onde os terremotos se concentram.

4. A Terra pode ser dividida em crosta, manto e núcleo. A crosta é a camada superficial rígida da Terra, que vai da superfície a aproximadamente 33 km nos continentes e da superfície até aproximadamente 6 km nos oceanos. Abaixo da crosta há o manto, que é sólido para esforços de curto período, mas se comporta como um fluido muito viscoso no tempo geológico (esforços aplicados durante milhões de anos). Abaixo do manto temos o núcleo, que é composto por ferro e níquel, e pode ser dividido em duas regiões: o núcleo externo, que é fluido, e o núcleo interno, que é sólido.

5. Não. Ambas são camadas que iniciam na superfície terrestre, mas são definidas a partir de propriedades distintas e possuem características distintas. A crosta é a camada superficial rígida da Terra, que vai da superfície a aproximadamente 33 km nos continentes e da superfície até aproximadamente 6 km nos oceanos, e é definida por sua composição e propagação de ondas sísmicas, que aumentam sua velocidade gradativamente nesta camada. A litosfera é definida com base na propriedade mecânica das rochas, sendo a camada onde as rochas apresentam comportamento rúptil, ou seja, podem acumular esforços e liberá-los, quando estes ultrapassam o limite de ruptura da rocha. Pode ser definida pela profundidade onde a temperatura atinge 1.250 °C, e tem aproximadamente 200 km de espessura sob os continentes e aproximadamente 100 km sob os oceanos.

6. Não. O campo magnético terrestre é gerado pela movimentação do material metálico fluido do núcleo externo ao redor do material metálico sólido do núcleo interno. As rochas da

superfície que apresentam magnetização significativa ocorrem raramente e não são capazes de explicar as características do campo magnético de nosso planeta.

7. Não. Os vulcões normalmente ocorrem nas bordas das placas litosféricas, acompanhando os cinturões sísmicos mais importantes, como o “cinturão de fogo do Pacífico”. Vulcões presentes no interior das placas litosféricas são raros.

8. Não. Os blocos continentais existentes na época da solidificação das camadas superficiais terrestres se movimentam com o passar do tempo, separando-se em alguns casos e aglutinando-se em outros. Assim, a América do Sul e a África, por exemplo, faziam parte de um único bloco continental há 135 milhões de anos, quando se iniciou o processo de ruptura e separação dos dois atuais continentes e o surgimento do Oceano Atlântico Sul. Isso ocorreu também com as demais massas continentais e assoalhos oceânicos que existem na atualidade.

9. Não. A teoria da Deriva Continental postulava que os continentes sempre existiram na forma como são atualmente, mas durante o tempo geológico se separaram ou colidiram, mudando sua configuração. Nesta teoria, os continentes eram massas de rochas que se movimentavam sobre o assoalho oceânico, e não se conseguiu explicar que tipo de força poderia gerar este movimento. A Teoria da Tectônica de Placas postula que os continentes são partes de blocos maiores, as placas litosféricas, e que estas placas interagem entre si, colidindo ou afastando-se, gerando novo material nas zonas de divergência e consumindo material nas zonas de convergência.

10. Como a densidade média das rochas da superfície é de aproximadamente $2,7 \text{ g/cm}^3$, ao se determinar que a densidade média da Terra era de $5,5 \text{ g/cm}^3$ percebeu-se que a Terra não poderia ser homogênea, com distribuição de massa uniforme, mas teria que ter uma massa maior no interior do que a que existe na superfície.

11. É a primeira camada atmosférica, que vai da superfície até aproximadamente 12 km. Ela concentra quase 75% da massa da atmosfera toda, e é nela que ocorrem os principais fenômenos atmosféricos, como nuvens, ventos, chuvas, raios, tornados. A temperatura e a pressão nesta camada diminuem com a altitude.

Testes:

1 (a), 2 (c), 3 (b), 4 (d acho...), 5 (b), 6 (c), 7 (c), 8 (a), 9 (a).

CAPÍTULO 5 - SISTEMAS PLANETÁRIOS

Enos Picazzio

OBJETIVOS

Discutir a origem de sistemas planetários que surgem como decorrência da formação de estrelas, particularizando a discussão para o Sistema Solar. Com um breve histórico da evolução das concepções geocêntrica e heliocêntrica, introduzem-se as leis de Kepler e as leis dinâmicas de Newton. Os corpos do Sistema Solar são discutidos segundo categorias, ou seja, planetas, planetas-anões, satélites e corpos menores (asteroides, cometas, corpos transnetunianos, meteoroides).

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

OS MODELOS PLANETÁRIOS

Por séculos a concepção humana do cosmos foi discutida à luz da filosofia e da religião, e dos conhecimentos científicos limitados da época. A concepção geocêntrica é a mais intuitiva, pois os movimentos aparentes são relativos ao nosso planeta. Por isso, a Terra ocupava o centro do Universo. Esta visão perdurou até o início do século 16. O sucesso do modelo geocêntrico deve-se em grande parte à limitação dos instrumentos astronômicos da época. As observações eram visuais. O uso do telescópio na astronomia ocorreu apenas em 1609.

O geocentrismo

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

Cláudio Ptolomeu foi o mais ilustre representante do geocentrismo. Ele sistematizou o sistema geocêntrico, compilou os conhecimentos de 500 anos de astronomia grega e desenvolveu teorias próprias. Sua obra mais importante foi o *Almagestum*.

O universo ptolomaico era finito e constituído de esferas concêntricas centradas na Terra. Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno giravam em torno da Terra em órbitas circulares e movimento uniforme (velocidade constante) e as estrelas tinham posições fixas na última esfera. Ptolomeu introduziu os conceitos de epiciclos, deferentes e equante. O epiciclo era a órbita circular do planeta. O deferente era a órbita circular do centro do epiciclo. A Terra

e o equante estavam fora do centro do deferente e de lados opostos. Visto do equante, o movimento do centro do epiciclo era uniforme. Visto da Terra o movimento do planeta não era uniforme. Esta configuração explicava razoavelmente bem a variação de velocidade aparente do planeta, seu tamanho aparente, e a inversão de movimento (oeste-leste-oeste).

O heliocentrismo

Nicolau Copérnico não criou o sistema heliocêntrico, mas o resgatou do grego Aristarco, de Samos. Este sistema segue em diversos aspectos a estrutura do modelo de Ptolomeu, como a crença em esferas (orbes) transparentes concêntricas, órbitas circulares e movimentos uniformes. Os deferentes são circulares e centrados no Sol. Os epiciclos também presentes no modelo copernicano introduzem correções menores, podendo tornar as previsões de posição dos planetas próximas daqueles previstas através de uma órbita elíptica. Copérnico descartou o equante.

O sistema ticoniano

O maior legado de Tycho Brahe foi sem dúvida o conjunto de medidas coletadas ao longo de décadas de observação. A precisão obtida por ele era em média dez vezes maior que a do Almagesto.

Tycho aceitava o modelo copernicano, mas refutava o Sol como centro do universo. Para ele os planetas giravam em torno do Sol, mas este girava em torno da Terra. Seu argumento era coerente com suas observações: o fato de a Terra circular o Sol implicaria em paralaxe (mudança de posição aparente das estrelas). Suas observações não exibiam essa paralaxe.

As leis empíricas de Kepler

Em 1600 Johannes Kepler tornou-se assistente de Tycho Brahe. Após a morte repentina de Tycho em outubro do ano seguinte, Kepler dedicou-se ao cálculo da órbita de Marte. Em 1605 Kepler chegou a duas das suas primeiras leis. Primeira lei: os planetas se movem em órbitas elípticas e o Sol ocupa um dos focos da elipse. Segunda lei: a linha reta que une o planeta ao Sol (raio vetor) varre áreas iguais, em intervalos idênticos de tempo. A Terceira lei foi concluída em 1617: a razão entre o quadrado do período orbital e o cubo do semi-eixo maior – ou da distância média – é constante: $(P^2/d^3) = K$; com P em anos, d em unidade astronômica. K é aproximadamente igual para todos os planetas.

Galileu Galilei e Isaac Newton

Galileu Galilei estudou o movimento dos corpos na superfície da Terra, procurando estabelecer uma nova física para seus movimentos. Com seus experimentos Galileu compreendeu o fenômeno da resistência dos corpos de modificarem seu estado dinâmico e o formalizou como “princípio da inércia”: se um corpo se deslocar em linha reta com velocidade constante, ele continuará indefinidamente nesse movimento se nenhuma força atuar sobre ele. Isto explica por que as órbitas dos planetas são fechadas.

Isaac Newton estudou profundamente o movimento dos corpos. Para tanto, ele criou duas ferramentas matemáticas apropriadas: o cálculo diferencial e o cálculo integral. Suas três leis são as seguintes. Primeira Lei (da Inércia): na ausência de influência externa (for-

ça), um corpo em repouso permanece em repouso, enquanto um corpo em movimento continua a mover-se com velocidade constante e em linha reta (movimento retilíneo uniforme). Segunda Lei: a força total sobre um corpo é dada pelo produto da sua massa pela aceleração a que está submetido ($F = m \cdot a$). Terceira Lei (da ação e reação): para toda força que atua sobre um corpo existe outra de reação, de mesma intensidade, atuando na mesma direção, mas em sentido oposto.

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

SISTEMAS PLANETÁRIOS

Sistema planetário é o conjunto de objetos não estelares, tais como planetas, satélites, asteroides, cometas fragmentos menores, que orbitam uma ou mais estrelas. Esses sistemas surgem durante os estágios de formação estelar, por isso o Universo deve estar repleto de planetas.

O sistema planetário do Sol é chamado Sistema Solar. Ele é único, pois só essa estrela chama-se Sol. Os corpos deste sistema se agregam pela ação da força gravitacional do Sol. O conjunto de objetos é formado por corpos diferentes em tamanho, composição química, distância, etc. A região limítrofe do Sistema Solar é a esférica Nuvem de Oort, cujo raio atinge quase um terço da distância do Sol à estrela mais próxima (Próxima do Centauro).

Os planetas gasosos do Sistema Solar

Os planetas gasosos, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, são muito diferentes dos planetas rochosos. Eles são enormes esferas ligeiramente achatadas de gás de diferentes espécies. Suas massas são elevadas assim como seus volumes, por isso têm baixas densidades. Eles não possuem superfícies sólidas como os planetas rochosos, mas podem apresentar uma camada de gás liquefeito. Júpiter e Saturno são formados principalmente por hidrogênio e hélio, enquanto que Urano e Netuno possuem de 10 a 20% menos destes elementos.

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

Júpiter

Júpiter agrega mais massa que todos os planetas, satélites, asteroides e cometas juntos. Seu volume equivale a 1.400 vezes o da Terra e sua densidade (massa/volume) é apenas um quarto da terrestre. Ele completa uma volta em torno do Sol a cada 11,9 anos e gira sobre seu eixo em apenas 9 horas e 54 minutos. O planeta irradia o dobro da energia que recebe do Sol. Esse calor extra é gerado por lenta contração gravitacional, que comprime o planeta alguns milímetros por ano.

Sua atmosfera é complexa e dominada por cinturões paralelos ao seu equador por onde circulavam gases atmosféricos com velocidades de até 650 km/h. A alta atmosfera é composta de aproximadamente 80% de gás hidrogênio (H_2) e no restante predomina o gás hélio (He). Metano (CH_4), amônia (NH_3) e água (H_2O) predominam entre as espécies atmosféricas mais densas. A característica mais peculiar de Júpiter é a Grande Mancha Vermelha localiza-

da no hemisfério sul do planeta. Trata-se de uma tempestade anticiclônica (de alta pressão) semelhante àquelas que ocorrem na Terra, mas muitíssimo maior e mais intensa.

No interior do planeta o hidrogênio torna-se líquido. A 20.000 km de profundidade a temperatura sobe para 10.000 K e o hidrogênio líquido adquire propriedade condutora, como os metais, por isso ele é classificado como hidrogênio líquido metálico. A magnetosfera de Júpiter origina-se nesta camada. É possível que o núcleo de Júpiter seja composto de material rochoso e metais, cuja massa pode ser até quinze vezes maior que a massa terrestre. A temperatura desse núcleo pode atingir 30.000 °C.

Saturno

Saturno completa uma volta em torno do Sol em 29,5 anos, mas gira sobre seu eixo em 10 horas e 39 minutos. Ele também irradia mais energia do que recebe do Sol. O calor produzido localmente provém da lenta separação de gases: os gases mais densos afundam lentamente para o interior e os mais leves flutuam. O atrito entre as moléculas aquece o gás do meio, liberando calor.

As propriedades gerais e a estrutura interna de Saturno são parecidas com as de Júpiter. A atmosfera é complexa, tem faixas de circulação paralelas e distribuídas em latitude, jatos, zonas de alta e baixa pressão e manchas. Hidrogênio e hélio são os constituintes majoritários. No topo da atmosfera a amônia (NH_3) congelada é abundante. Saturno apresenta duas manchas pequenas no hemisfério sul, bem menores que a Grande Mancha Vermelha de Júpiter.

Até a profundidade de 30.000 km, sob temperatura de 8.000 K, prevalece o hidrogênio molecular. Abaixo dessa região há uma camada de hidrogênio líquido metálico semelhante ao de Júpiter, que gera o campo magnético do planeta. O núcleo deve ser rochoso e rico em metais.

Urano

Seu ano corresponde a aproximadamente 84 anos terrestres. Um dia local dura 17 horas e 15 minutos. Seu eixo de rotação é quase paralelo ao plano de sua órbita e a rotação é retrógrada. Durante os solstícios um dos polos fica voltado para o Sol (verão) enquanto o outro permanece na escuridão (inverno). Nos equinócios o equador permanece voltado para o Sol. As estações sazonais mudam a cada 21 anos.

A atmosfera de Urano é composta aproximadamente de 83% de hidrogênio, 15% de hélio, 2% de metano e traços de etano, acetileno e outros hidrocarbonetos (compostos baseados em hidrogênio e carbono). O metano absorve preferencialmente luz avermelhada, dando ao planeta a cor ciano. Nele também existem cinturões de circulação atmosférica. Nas proximidades do equador os ventos se movem na mesma direção de rotação do planeta com velocidade entre 140 e 580 km/h.

Sua estrutura interna é composta de um núcleo rochoso, um manto de gelo e um envelope gasoso de hidrogênio e hélio.

Netuno

Netuno demora quase 165 anos para dar uma volta completa em torno do Sol, e o dia local tem 16 horas e 6,5 minutos. A inclinação de seu eixo de rotação é quase igual à da Terra. Cada estação sazonal dura cerca de 41 anos.

Netuno se parece muito com Urano. Sua atmosfera é composta de hidrogênio, hélio, metano e amônia, porém é mais estruturada. Sua cor azulada deve-se à absorção da luz vermelha

pelo metano. O planeta apresenta as maiores velocidades de circulação atmosférica do Sistema Solar, com ventos movendo-se a 2.400 km/h.

Netuno possui uma Mancha Escura semelhante à Grande Mancha Vermelha de Júpiter, porém menos estável. Abaixo da atmosfera há um manto líquido superaquecido como o de Urano, feito essencialmente de água, amônia e metano. O núcleo deve ser composto de material rochoso e metais, provavelmente no estado líquido.

III. PLANETAS ROCHOSOS DO SISTEMA SOLAR

Mercúrio, Vênus, Terra e Marte são planetas rochosos. As condições ambientais são bem diferentes, mas a estrutura básica é similar. Há muitas semelhanças entre Vênus e Terra, mas por estar mais próximo do Sol Vênus teve um destino bem diferente da Terra. Como Mercúrio e Marte são menores, as camadas internas estão submetidas a pressões menores que no caso terrestre.

Vênus

Comparativamente à Terra, Vênus tem 81% de sua massa e 86% do seu volume. A pressão central (no núcleo) deve ser algo em torno de 80% da terrestre, mas o interior do planeta tem estrutura semelhante à da Terra. Em diâmetro, seu núcleo deve corresponder a 45% do tamanho do planeta, contra 55% no caso terrestre.

Vênus tem um ambiente extremamente hostil. Na superfície, a pressão atmosférica atinge 90 atm e a temperatura chega a 480 °C. Parte da atmosfera é rica em ácido sulfúrico, mas o constituinte majoritário é o dióxido de carbono (CO₂). Ele é o responsável pelo elevado aquecimento do planeta.

A superfície parece ser uma placa litosférica única, praticamente plana e lisa, com *canyons*, vulcões extintos, fluxos de lava, fissuras, montanhas e crateras. Há apenas dois continentes: Ishtar Terra e Afrodite Terra. Ishtar Terra está localizada nas imediações do polo norte e tem o tamanho aproximado da Austrália. Ali se encontra a maior montanha venusiana, o Monte Maxwell, com 11 km de altura. Afrodite Terra está na região equatorial e tem tamanho equivalente ao da África.

Mercúrio e Marte

Comparativamente a Vênus e Terra, estes planetas têm massas bem menores e suas estruturas internas são relativamente diferentes. Proporcionalmente ao planeta, o núcleo de Mercúrio é volumoso e maciço e o de Marte é pequeno e pouco maciço. Ambos são metálicos. Em raio, o núcleo terrestre corresponde à metade da Terra, o de Marte a cerca de um terço e o de Mercúrio pode chegar a três quartos do planeta.

A superfície de Mercúrio é muito antiga (3 a 4 bilhões de anos), apresenta sulcos e terrenos variados, alguns fortemente marcados por crateras de impacto, outros livres delas. Podemos distinguir três tipos básicos de terrenos: (a) planícies que lembram os mares lunares, (b) planícies intercrateras, (c) planaltos acidentados, irregulares, levemente parecidos com algumas regiões lunares.

Marte já teve água líquida na superfície, porém agora é um planeta árido. A água que restou está congelada nas capas polares e no subsolo. Há marcas enormes de erosão fluvial ocorrida no passado.

O hemisfério norte marciano é plano e coberto por material basáltico proveniente de vulcanismo. O hemisfério sul, ao contrário, é mais elevado, desnivelado, mais antigo e recoberto por crateras, a maioria de impacto.

Com 600 km de base e 27 km de altura o Monte Olimpo é três vezes mais alto que o Monte Everest. Ele é o maior vulcão extinto do Sistema Solar. Os demais vulcões marcianos são menores que ele, porém maiores que os encontrados na Terra.

Apesar de ser rarefeita e fina, a atmosfera marciana apresenta ventos sazonais, relacionados com o aquecimento solar. Há fortes tempestades de areia e redemoinhos que erodem a superfície e criam dunas.

Os planetas-anões

Com a descoberta de Eris, que é maior que Plutão, uma definição mais técnica de planeta tornou-se imprescindível. Essencialmente, planeta-anão é um objeto que orbita o Sol, é grande o suficiente para ter formato esférico, porém não é gravitacionalmente dominante na sua órbita.

As órbitas dos planetas-anões são mais excêntricas (alongadas) e mais inclinadas em relação ao plano da eclíptica que as órbitas dos planetas. Excetuando Ceres e possíveis candidatos do Cinturão Principal, os planetas-anões estão na região transnetuniana (adiante de Netuno). Na parte interna dessa região, mais próxima de Netuno, existe uma aglomeração de objetos na forma de um cinturão, conhecido como Cinturão de Edgeworth-Kuiper, conhecido pela sigla inglesa KBO. Plutão é o objeto mais conhecido dessa região.

Atualmente há cinco planetas anões: Ceres (do cinturão principal de asteroides), Eris, Plutão, Makemake e Haumea, mas há vários candidatos à espera de classificação.

Estes objetos têm densidades próximas de 2 g/cm^3 , sugerindo a mistura de material rochoso e gases congelados. São ricos em água e metano. Plutão tem atmosfera. No verão local a atmosfera é densa e espessa. As variações extremadas das condições sazonais de Plutão devem-se à diferença entre as distâncias periélica (29,6 UA) e afélica (49,3 UA).

Ceres se encontra no cinturão principal de asteroides, por isso era classificado como asteroide. Ele é aproximadamente esférico (aproximadamente 950 km de diâmetro) e concentra quase um terço da massa total do cinturão. Internamente ele deve ser estruturado em camadas, com um núcleo rochoso denso recoberto por um manto de água doce congelada, por sua vez envolto por uma crosta fina. Seu manto concentra 25% da sua massa e pode conter mais água doce que a Terra.

OS SATÉLITES

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

Lua

A Lua formou-se a partir de um impacto violentíssimo entre um corpo com as dimensões de Marte e a Terra, há 4 bilhões de anos. O material que formou Lua teria sido arrancado das crostas dos dois corpos.

Estruturalmente, a Lua pode ser dividida em três camadas básicas: (a) uma crosta assimétrica com espessura de 60 km no hemisfério voltado para a Terra, e de 100 km no hemisfério oposto; (b) um manto com 935 km de espessura; (c) um núcleo possivelmente sólido, com 738 km de raio. Como a densidade das rochas da superfície é muito próxima da densidade média da Lua, o núcleo não deve ser muito maciço.

Sua superfície apresenta basicamente dois tipos de terreno: (a) mares – regiões planas, baixas, escuras e de composição basáltica. Eles se formaram entre 3,8 e 4 bilhões de anos atrás através de um processo duplo: impactos violentos de corpos com diâmetros superiores a 30 km geraram atividade vulcânica. (b) continentes – terras altas, acidentadas, de alta refletividade (brilhantes) e marcadas por crateras de impacto, mais antigas que os mares. Toda a superfície lunar é recoberta por uma camada relativamente espessa de poeira, chamada *regolito*.

Satélites de Marte

Fobos e Deimos são dois satélites rochosos, pequenos e assimétricos. Fobos dá uma volta em torno de Marte em apenas 7,7 horas, enquanto Deimos demora 30,2 horas. Como o dia marciano tem aproximadamente 24 horas, Fobos cruza o céu de Marte de oeste para leste em 11 horas, e Deimos de leste para oeste em 2,7 dias locais.

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

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

Satélites de Júpiter

O sistema de satélites de Júpiter é composto de pouco mais de 60 corpos. Em ordem de distância de Júpiter, os maiores são Io, Europa, Ganimedes e Callisto. Eles são conhecidos como satélites galileanos.

Pela proximidade com o planeta, Io sofre maré intensa que o deforma e dissipa energia suficiente para provocar vulcanismo. Ele é pouco maior que a Lua. Sua cor amarelada é decorrente das erupções contínuas, que incluem enxofre líquido e compostos sulfurosos.

Europa tem superfície congelada, com presença de rachaduras, enrugamentos, trincas e desalinhamento de blocos de gelo que lembram as regiões polares da Terra. Portanto, deve haver oceano abaixo do gelo. A presença de poucas crateras indica que sua superfície é geologicamente jovem.

Ganimedes é o maior satélite do Sistema Solar. Ele é maior que Mercúrio. O relevo de sua superfície lembra o da Lua, com a diferença que ela é de gelo não de rochas. As regiões escuras são antigas, por isso há tantas crateras de impacto. As regiões claras são mais jovens e

têm poucas crateras. Ganimedes pode ter sido fundido (derretido) por colisões violentas no passado remoto. As rochas mais densas afundaram em direção ao centro.

Calisto se parece muito com Ganimedes, porém sua superfície é mais antiga (tem maior quantidade de crateras). Sua estrutura interna não é similar a de Ganimedes.

Satélites de Saturno

A quantidade de satélites de Saturno é parecida com a de Júpiter. Titan, o maior satélite, é pouco maior que Mercúrio e ligeiramente menor que Ganimedes. Ele possui atmosfera extensa, rica em metano e etano, e superfície com relevo acidentado e lagos de metano. O ciclo sazonal do metano em Titã assemelha-se ao ciclo da água na Terra. No verão, o metano congelado nos topos de montanhas se liquefaz e escorre para as partes mais baixas na forma de riachos e rios que desembocam nos lagos. A atmosfera primitiva da Terra pode ter sido parecida com a de Titã.

Há, ainda, mais quatro satélites de ultrapassam 1.000 km de diâmetro: Reia, Iapetus, Dione e Tétis. Os demais satélites são bem menores.

Satélites de Urano

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

Satélites de Netuno

Netuno tem apenas um satélite de grandes proporções: Tritão, pouco maior que Plutão. Os demais satélites netunianos são bem menores. Tritão tem variedade de terrenos, de penhascos profundos a planícies em lagos congelados, provavelmente de água. Ele possui uma atmosfera muito tênue de nitrogênio. Na região polar sul há regiões cobertas por neve de nitrogênio. Ele apresenta gêiseres de nitrogênio líquido.

Talvez a superfície mais bizarra do Sistema Solar seja a de Miranda. São terrenos distintos, com ranhuras, fissuras, sulcos, etc. que denotam um passado violento, possivelmente de colisões com outros corpos.

VI. ASTEROIDES E CORPOS TRANSNETUNIANOS

Asteroides são objetos rochosos, relativamente pequenos, com formas e tamanhos diversos. A maior parte deles está concentrada, no *cinturão principal de asteroides*, entre Marte e Júpiter (de 2 a 4 UA). A massa total dos asteroides do cinturão é da ordem de um milésimo da massa da Terra.

Alguns asteroides podem ser agrupados em função das características de suas órbitas, sem que mantenham necessariamente relação entre si. Outros, no entanto, apresentam órbitas tão similares que podem ter uma origem comum, por exemplo, a fragmentação de corpos maiores decorrentes de colisão. As maiores famílias têm centenas de asteroides, mas as menores possuem apenas alguns membros. Conhecemos cerca de duas a três dezenas de famílias, a maioria no cinturão asteroidal.

Os asteroides *Troianos* giram em torno do Sol na mesma órbita de Júpiter. Eles se concentram em duas regiões específicas e equidistantes do planeta, 60° à frente e 60° atrás. Esses locais são conhecidos como *pontos de Lagrange* L_4 e L_5 .

Com relação à composição química, os asteroides podem ser classificados em três grupos básicos: ricos em silício (S), em carbono (C) e em metais (M), como os meteoritos. Já os corpos da região transnetuniana têm composição química mista, mesclando material rochoso com gases congelados. As evidências indicam a presença de água congelada, carbono, silicatos, nitrogênio, metano, etano, metanol, dióxido de carbono, macromoléculas orgânicas e outras espécies. Esses corpos preservam a composição química primitiva do material que formou o Sistema Solar.

A região entre 30 e 50 UA do Sol abriga o Cinturão de Edgeworth-Kuiper. É possível que nele existam cerca 100.000 corpos com diâmetros maiores que 100 km e algo como 1 bilhão de objetos com diâmetros entre 100 e 10 km. Plutão é o mais famoso desses objetos. Tritão pode ter pertencido a esse cinturão antes de se tornar satélite de Netuno. Outros objetos bem conhecidos dessa região são os planetas-anões Eris (maior que Plutão), Makemake, Haumea.

Cometas são corpos de massa pequena, composta essencialmente de gases congelados como água (80%), monóxido de carbono (10%), dióxido de carbono (3,5%), compostos orgânicos ricos em carbono (alguns %). Geralmente, essa massa compacta (núcleo) não é esférica e dificilmente ultrapassa algumas dezenas de quilômetros.

Ao se aproximar do Sol, a temperatura superficial do núcleo aumenta e o material volátil é sublimado, isto é, passa da fase sólida diretamente para a fase gasosa. O gás expelido na forma de jato arrasta os grãos impregnados e forma a *coma* e as *caudas*. Juntos, núcleo e coma formam a cabeça do cometa.

Os cometas podem apresentar até duas caudas. A estreita e linear, geralmente de cor azulada, é composta de gás ionizado (Tipo I). A cauda amarelada, larga e curva é composta de gás neutro e poeira (Tipo II). Nos grandes cometas, as caudas podem atingir comprimentos de até 1 UA.

A longevidade de um cometa depende essencialmente do período. Quanto menor for o período orbital mais frequentes serão as aproximações ao Sol e mais rapidamente o cometa perderá sua componente volátil. O que restar dele será um bloco rochoso sem coma e cauda, parecido com um asteroide. Normalmente os cometas novos têm órbitas muito alongadas (elipses de elevada excentricidade), que os levam a distâncias enormes do Sol. Estes cometas detêm as maiores longevidades. Na realidade eles vêm da Nuvem de Oort, um invólucro que circunda o Sistema Solar, entre 5.000 e 100.000 UA, e que pode conter até 1 trilhão de cometas.

VII. ANÉIS PLANETÁRIOS E METEOROIDES

Anéis planetários são constituídos de blocos rochosos e gelo. Alguns são tão pequenos quanto grão de areia, outros têm o tamanho de um carro. Comparativamente aos seus diâmetros, os anéis são finos, planos e localizam-se no plano equatorial do planeta.

Todos os planetas gasosos têm anéis, porém os de Saturno são os mais exuberantes. O conjunto de anéis é complexo e estende-se de 6.600 km até cerca de 121.000 km adiante de Saturno. A espessura dificilmente ultrapassa 20 km. Ao todo são 7 anéis, 9 estruturas aneladas, 2 divisões, 14 lacunas e 18 pequenos satélites. A principal lacuna é a Divisão de Cassini, entre os anéis A e B. Existem satélites entre os anéis. Algumas dessas lacunas decorrem da ação gravitacional de satélites. O anel F é constituído de gelo expelido do satélite Encélado, cuja órbita é o próprio anel.

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

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

Meteoróide é nome genérico de fragmentos rochosos que vagam pelo espaço, com tamanhos entre 0,1 mm e 10 m. Um objeto maior que 10 m é considerado asteroide e menor que 0,1 mm é considerado grão de poeira (ou micrometeoróide).

Ao passar pela atmosfera o meteoróide sofre atrito com os gases atmosféricos, é parcialmente vaporizado e produz um rastro luminoso denominado *meteoro* (a popular estrela cadente). A chuva de meteoros parece provir de uma direção específica do céu, chamada radiante. A chuva de meteoros recebe o nome da constelação onde estiver seu radiante. Geralmente, estas chuvas estão associadas a cometas. Quando a Terra cruza a órbita de um cometa, os restos que permaneceram em órbita caem na Terra produzindo uma chuva de meteoros.

Os meteoróides que sobrevivem à passagem pela atmosfera atingem o solo e passam a ser chamados *meteoritos*. Os meteoritos podem ser classificados em três grupos básicos: metálicos (essencialmente ferro e níquel), rochosos (essencialmente rocha) e ferropétreos (mistura dos dois tipos).

VIII. ESTRUTURA E FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

A Estrutura

O Sol detém 99,8% da massa do Sistema Solar. A região do plano da eclíptica contida até a distância de 4 UA do Sol é dominada por objetos rochosos. Nela há quatro planetas, um planeta anão (Ceres) e milhares de asteroides. Mercúrio é o menor planeta do Sistema Solar e o menor dentre os planetas rochosos. Vênus e Terra são muito parecidas em tamanho, massa e composição química, mas bem diferentes em condições ambientais. Marte tem tamanho intermediário entre Mercúrio e Terra. Dos quatro planetas rochosos, só a Terra tem água em abundância e nos três estados físicos (sólido, líquido e gasoso).

Entre Marte e Júpiter, há um cinturão de asteroides rochosos de tamanhos e formas variadas. A região entre 5 UA e 31 UA do Sol é povoada pelos planetas gasosos e seus satélites, e por famílias de cometas de curto período.

Júpiter e Saturno são os maiores planetas gasosos, cada qual com cerca de seis dezenas de satélites. Ganimedes (Júpiter) e Titã (Saturno) são maiores que Mercúrio. Io (Júpiter) apresenta a maior atividade vulcânica do Sistema Solar e Titã tem atmosfera mais densa que a terrestre.

Urano e Netuno têm menos satélites que Júpiter e Saturno. Urano tem quatro satélites grandes (Ariel, Umbriel, Titânia e Oberão) e Netuno tem apenas um (Tritão, que é do tamanho de Plutão).

A região entre 30 UA e 50 UA é ocupada pelo Cinturão de Edgeworth-Kuiper. Os objetos desse cinturão são compostos de rocha, gelo e gases congelados, sobretudo hidrocarbonetos e amônia, e têm períodos orbitais da ordem de duas centenas de anos. São muito ricos em água. O objeto mais famoso dessa região é o Plutão.

A nuvem de Oort, entre 30.000 UA e 100.000 UA, é composta de cometas. Ela é a região limítrofe do Sistema Solar. Mesmo sendo grande, essa distância equivale a um terço da distância da estrela Próxima Centauro, a mais próxima do Sol.

A Formação

O Sistema Solar se originou de uma nuvem de gás e poeira, há cerca de 4,6 bilhões de anos. Durante a contração, um embrião do Sol (*protossol*) formava-se no centro da nuvem. Quanto mais a nuvem se contraía, mais rapidamente ela girava. Dessa rotação surgiu um disco de matéria na região equatorial do protossol. Esse sentido de rotação da nuvem é o que predominou no Sistema Solar.

Os corpos rochosos se formaram perto do Sol em uma região quente em que predominava materiais de temperatura de fusão elevada, através da acreção (acúmulo gradativo de matéria por colisão). Parte das crateras formadas nas colisões ainda permanece exposta nas superfícies de planetas e satélites.

A região onde se formaram os planetas gigantes era mais fria e composta predominantemente por gases. Estes planetas se formaram por processo mais parecido com o de formação das estrelas, que pode ser mil vezes mais rápido que o de acreção. A maioria dos satélites se formou próximo de seus planetas. A matéria que não foi acrescentada aos planetas e satélites formou asteroides, cometas e objetos transnetunianos.

IX. SISTEMAS PLANETÁRIOS EXTERNOS (EXOPLANETAS OU PLANETAS EXTRASSOLARES)

As descobertas de novos exoplanetas crescem rapidamente, tornando impossível manter atualizada qualquer tabela impressa. Neste caso, a melhor opção é consultar diretamente a página da Enciclopédia de Planetas Extrassolares (<http://exoplanet.eu/index.php>).

TESTES

Completar:

- O plano básico do Sistema Solar é o que contém _____.
- O Cinturão Principal de asteroides fica entre os planetas _____ e _____.
- Sabe-se que uma superfície planetária é jovem quando ela apresenta _____.
- Kepler descobriu que as órbitas dos planetas são _____.
- A temperatura na superfície de Vênus é _____ que a da superfície terrestre.
- Marte já teve _____ na superfície. Atualmente, o planeta é árido.
- Marte tem o maior vulcão _____ do Sistema Solar.
- Ceres já foi classificado como _____ do cinturão principal, mas foi reclassificado como _____.
- Na órbita de Júpiter há dois grupos de asteroides chamados _____.
- Júpiter é quem apresenta o dia mais _____ dentre os planetas.
- O dia de Vênus é o mais _____ dentre os planetas.
- Júpiter emite _____ energia que recebe do Sol.
- Júpiter _____ anéis.
- Saturno tem _____ anéis.
- A cor ciano de Urano é provocada pela absorção da luz vermelha pelo gás _____.
- A Grande Mancha Vermelha pertence ao planeta _____.
- Os cometas são compostos principalmente de _____.
- A cauda retilínea e azulada dos cometas é feita de _____.

_____ é uma rocha que vaga pelo espaço. Quando cai na Terra e é encontrada no solo passa a se chamar _____.
Estrela cadente é o nome popular de _____.

Falso (F) ou verdadeiro (V):

1. Na Antiguidade, Ptolomeu propôs o sistema geocêntrico, no qual a Terra orbitava o Sol, assim como os outros planetas. ()
2. Ptolomeu explicou o movimento retrógrado dos planetas externos pelo sistema de epíclis. ()
3. Nicolau Copérnico (1473 – 1543) resgatou as ideias de Aristarco (270 a.C.) de que a Terra girava ao redor do Sol e em órbitas circulares. ()
4. Tycho Brahe foi o maior astrônomo observador da era pré-telescópica. ()
5. Os planetas rochosos se formaram em região relativamente quente e os gasosos em regiões mais frias. ()
6. Asteroides são corpos rochosos pequenos e a maioria se concentra no cinturão de Edgeworth-Kuiper. ()
7. Cometas são asteroides concentrados na Nuvem de Oort. ()
8. Marte tem vulcões ativos como a Terra [os vulcões são inativos]. ()
9. Mercúrio tem superfície muito antiga, evidenciada pela abundância de crateras de impacto de tamanhos diferenciados. ()
10. Vênus e Terra são muito parecidas, mas a sua superfície é bem mais fria. ()
11. Io é o corpo que apresenta a maior atividade vulcânica do Sistema Solar. ()
12. O vulcanismo de Io é provocado essencialmente pelo aquecimento de Júpiter. ()
13. Abaixo da superfície congelada do satélite Europa há um oceano. ()
14. O satélite Titã tem ciclo sazonal. No inverno a água se condensa nas regiões frias. No verão, há chuvas e a água escorre por canais fluviais. ()
15. Vênus tem tectônica de placas, vulcões ativos e inativos, sua superfície é antiga e fortemente marcada por erosão fluvial. ()
16. Fobos e Deimos cruzam o céu marciano em sentidos opostos e velocidades aparentes diferentes. ()

Escolher a afirmativa correta:

1. O maior planeta do Sistema Solar é: (a) Terra, (b) Sol, (c) Júpiter, (d) Saturno.
2. Temos evidências que: (a) os planetas são os maiores corpos do Sistema Solar, (b) os satélites são maiores que os asteroides, (c) os satélites são esféricos como os planetas, (d) há satélites maiores que planetas.
3. Kepler descobriu que: (a) os planetas movem-se com velocidade constante, (b) a velocidade orbital depende da distância ao Sol, (c) o período é igual ao cubo do semi eixo maior, (d) a taxa horária de variação da área descrita pelo raio vetor é variável.
4. A contribuição fundamental de Galileu ao estudo dos movimentos planetários foi: (a) a invenção da luneta astronômica, (b) seu trabalho sobre inércia, (c) a descoberta dos satélites de Júpiter, (d) mostrar que a Terra estava no centro do universo.
5. Newton mostrou que: (a) os planetas sofrem aceleração gravitacional do Sol, (b) nenhum planeta é atraído pelo Sol, (c) a órbita dos planetas são circulares, (d) a velocidade do planeta na órbita é constante.
6. Podemos dizer que: (a) os eclipses ocorrem perto dos solstícios, (b) os eclipses ocorrem

perto dos equinócios, (c) os eclipses lunares ocorrem perto dos equinócios e os solares dos solstícios (d) os eclipses nunca ocorrem perto desses pontos.

7. Podemos afirmar que: (a) a maré lunar é maior que a maré solar, (b) a maré solar é maior que a maré lunar, (c) as maiores marés ocorrem na fase lunar quarto minguante, (d) as maiores marés ocorrem só na fase lunar quarto crescente.

8. Sabemos que: (a) a superfície de Júpiter tem as maiores crateras do Sistema Solar, (b) Júpiter tem os maiores vulcões do Sistema Solar, (c) as superfícies dos planetas rochosos mostram crateras de impacto, (d) Saturno tem superfície congelada.

9. Por que na superfície da Lua há mais crateras que na superfície da Terra? (a) porque a Terra é protegida contra colisões pela própria Lua, (b) porque a gravidade da Lua é maior, logo atrai para si a maioria dos corpos que se aproximam de ambas, (c) porque a Lua é mais antiga que a Terra, (d) porque os processos geológicos terrestres encobriram as depressões e crateras antigas.

10. Em relação à quantidade de satélites: (a) Júpiter tem mais de 60 satélites e Saturno menos que 30, (b) ambos têm mais de 50 satélites cada um, (c) ambos têm menos satélites que Urano, (d) Júpiter têm mais satélites que a soma dos satélites dos demais planetas.

RESPOSTAS

Completar: (01) a órbita da Terra; (2) Marte, Júpiter; (3) poucas crateras; (4) elípticas (ou elipses); (5) maior (ou bem maior); (6) água líquida; (7) extinto; (8) asteroide, planeta-anão; (9) troianos; (10) curto; (11) longo; (12) mais; (13) tem; (14) sete; (15) metano; (16) Júpiter; (17) água congelada; (18) gás ionizado; (19) meteorito; (20) meteoro.

Falso ou verdadeiro: 1 (F) [Ptolomeu o aperfeiçoou]; 2 (V); 3 (V); 4 (V); 5 (V); 6 (F) [se concentra no cinturão principal, entre Marte e Júpiter]; 7 (F) [não são asteroides]; 8 (F); 9 (V); 10 (F) [bem mais quente]; 11 (V); 12 (F) [principalmente por maré]; 13 (V); 14 (F) [o ciclo sazonal é com metano, não com água]; 15 (F) [não tem tectônica de placas nem vulcões ativos; sua superfície é jovem e não tem água]; 16 (V).

Afirmativa correta: 1 (c); 2 (d); 3 (b); 4 (b); 5 (a); 6 (b); 7 (a) a maré lunar é maior que a maré solar; 8 (c); (d); 9 porque os processos geológicos terrestres encobriram as depressões e crateras antigas; 10 (b) ambos têm mais de 50 satélites cada um.

CAPÍTULO 6 - SOL

Vera Jatenco

OBJETIVOS

O objetivo deste capítulo é descrever as principais características do Sol. Sua estrutura interna é conhecida através de modelos matemáticos e da heliossismologia (estudo semelhante ao que se faz para conhecer o interior da Terra utilizando os abalos sísmicos). Por ser a estrela mais próxima da Terra e devido aos avanços observacionais como o telescópio espacial Hubble e as sondas espaciais temos conseguido obter informações detalhadas tanto de sua superfície como de sua atmosfera e do vento solar.

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

CARACTERÍSTICAS GERAIS

O Sol constitui-se de uma esfera de gás ionizado (plasma) brilhante, sustentada por sua própria gravidade e pelas forças geradas por reações nucleares que ocorrem no seu centro. Os gases no interior solar, principalmente hidrogênio e hélio, estão submetidos a temperatura, pressão e densidade muito elevadas, que aumentam com a profundidade em direção ao centro do Sol.

ESTRUTURA INTERNA

Assim, a estrutura interna do Sol pode ser representada por 3 camadas, sem nítidas fronteiras entre elas, estabelecendo regiões sob diferentes condições físicas. A região central é o núcleo onde ocorrem as reações de transformação de hidrogênio em hélio; a zona radiativa onde a energia viaja para fora na forma de radiação eletromagnética; e a zona convectiva onde a energia é transportada por células de convecção.

O estudo da estrutura interna do Sol é feito através de modelos matemáticos onde expressamos pressão, temperatura e composição química em função da massa ou raio solar. Podemos estudar o interior do Sol através de propagação de ondas no seu interior geradas quando ocorrem sismos, estudo denominado de *heliossismologia*.

SUPERFÍCIE E ATMOSFERA

A energia gerada no núcleo é transportada gradualmente até a superfície solar chamada fotosfera (esfera de luz) por onde essencialmente toda radiação na região visível do espectro é

emitida. Acima dela temos a atmosfera solar: cromosfera e coroa. Entre a cromosfera e a coroa há uma região de transição com onde a temperatura cresce rapidamente de 10.000 K a 50.000 K em algumas centenas de quilômetros.

Observações recentes feitas com o satélite solar SOHO (*the Solar and Heliospheric Observatory*) mostram que o campo magnético geral do Sol está associado à velocidade diferencial entre as camadas convectiva e radiativa e os complexos movimentos do gás no envelope convectivo. Este mecanismo é denominado efeito dínamo.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E ATIVIDADE DA SUPERFÍCIE E DA ATMOSFERA SOLAR

A fotosfera possui temperatura que varia entre 6.400 e 4.400 K, e apresenta um aspecto de granulação que é formada no topo da zona convectiva. As células de convecção aumentam de tamanho e transportam energia, por convecção, que será dissipada na fotosfera. Com o esfriamento, os gases voltam a descer pelas bordas escuras das células. A radiação proveniente do interior do Sol sofre absorção ao atravessar regiões mais frias na fotosfera. A absorção ocorre seletivamente em função dos átomos que compõem a fotosfera, formando as linhas de absorção específicas desses elementos químicos, conhecidas como linhas de Fraunhofer do espectro solar.

Manchas solares, regiões mais frias que a redondeza o que as torna escuras, são associadas a intensos campos magnéticos que inibem o transporte convectivo. Podem ter dimensões maiores que a da Terra. Aparecem em grupos, parte delas tem polaridade magnética norte, e parte tem polaridade magnética sul. Essas polaridades opostas sustentam arcadas magnéticas. O número e a localização varia com o ciclo de 11 anos das manchas solares e o campo magnético global se inverte. Assim, o ciclo magnético tem aproximadamente 22 anos. As manchas se movimentam no mesmo sentido de rotação solar e são utilizadas para estimar a rotação diferencial do Sol, isto é, a rotação em função da latitude solar.

A cromosfera (esfera colorida) é a camada logo acima da fotosfera caracterizada pelo rápido decréscimo na densidade. A temperatura aumenta da base para o topo, sendo em média 10.000 K. Sua cor avermelhada, devido à emissão da linha de hidrogênio da série de Balmer ($H\alpha$) em 656,2 nm. A principal linha de emissão no espectro cromosférico é a linha do hélio, que requer altas temperaturas para ser excitado.

As chamadas praias são regiões que apresentam maior atividade e são mais quentes que a vizinhança, por isso brilham mais. Observam-se também regiões escuras, com característica de segmento, que são chamados de filamentos, que são nuvens de material denso e frio suspenso acima da superfície solar por arcos de campo magnético. As células cromosféricas têm dimensão e tempo de vida bem maior que às da fotosfera, por isso, são chamadas supergranulações. Contornando as supergranulações, há jatos tênues de gás brilhante que recebem o nome de espículos e emitem principalmente radiação $H\alpha$. As chamadas protuberâncias são os arcos magnéticos por onde circula a matéria cromosférica. As linhas de campo magnético em forma de arcos que ligam manchas solares de polaridades opostas formam estruturas denominadas tubos magnéticos. Esses tubos podem movimentar-se de tal modo que acabam retorcidos. Isto implica em um armazenamento crescente de energia no interior do tubo à medida que a torção das linhas de campo aumenta. Quando as linhas se cruzam ocorre seu rompimento e posterior reconexão com a liberação violenta de toda energia armazenada, e são denominados *flares*. Observações espaciais no ultravioleta e em raios X indicam que a temperatura da matéria num *flare* (clarões) pode atingir 100 milhões K. Descobertas recentes mostram que um clarão pode produzir tremores sísmicos gigantescos que se propagam pelo interior solar.

A coroa solar é a região mais externa e mais extensa da atmosfera solar. Visível a olho nu somente em eclipses totais, caso contrário ela é ofuscada pela luz da fotosfera. O gás coronal é muito tênue e quente, atingindo temperaturas da ordem de 1 a 2 milhões K cuja explicação, ainda não totalmente compreendida, envolve campos magnéticos. A luz coronal pode ser dividida em três tipos: (a) Luz branca (ou coroa K) é o resultado do espalhamento da luz fotosférica pelos elétrons livres; (b) Coroa de emissão (ou coroa E) consiste na luz emitida em linhas por átomos altamente ionizados; e (c) Coroa em raios X consiste da emissão em linhas em raio X de íons ainda mais altamente ionizados.

Como os elétrons interagem com o campo magnético, a configuração da coroa é a do campo magnético global. Essa interação forma estruturas como os elmos, que cobrem as manchas solares e as regiões ativas, possui forma pontiaguda devido ao vento solar. Usualmente encontramos protuberâncias ou filamentos situados na base dessas estruturas. Plumas polares são estruturas alongadas que se projetam para fora do Sol nas regiões polares norte e sul. Sua forma também é devida à ação do vento solar. Os arcos coronais são formados por linhas fechadas de campo magnético que conectam regiões magnéticas de polaridades opostas. Buracos coronais são regiões (escuras) com configuração aberta das linhas de campo magnético por onde elétrons e prótons podem escapar para o meio interplanetário. Gigantescas explosões de plasma na forma de bolhas, que abandonam o Sol em elevadas velocidades, são conhecidas por ejeção de massa coronal. Essas explosões liberam até 100 milhões de toneladas de plasma e podem causar sérios danos a satélites artificiais terrestres.

VENTO SOLAR

A extensão da coroa solar é o chamado vento solar. Sua composição é basicamente a de um plasma eletricamente neutro, com elétrons e prótons em iguais proporções, átomos ionizados e campos magnéticos. Por conduzir calor de maneira eficiente mesmo a grandes distâncias do Sol a temperatura é elevada. À medida que o vento se expande e carrega consigo o campo magnético, sua velocidade aumenta e a densidade de partículas diminui. Nas proximidades da Terra a densidade varia de 400 mil a 80 milhões de partículas/m³ e a velocidade varia de 300 km/s (nos elmos) a 800 km/s nos buracos coronais. Embora o vento solar carregue cerca de 1 milhão de toneladas de matéria solar a cada segundo, menos que 0,1% da massa solar foi perdida desde o nascimento do Sol, há 4,6 bilhões de anos. Muitos estudos têm sido feitos no sentido de entender como e onde o vento solar é acelerado a estas altas velocidades. O vento solar interage fortemente com os planetas que possuem campos magnéticos como a Terra. Dois exemplos desta interação são as auroras polares e a cauda ionizada (Tipo I) dos cometas.

TESTES

Completar a frase:

1. A parte do Sol que vemos é chamada _____.
2. Acima da fotosfera temos a _____ e a _____.
3. Entre a cromosfera e a coroa solar fica a chamada _____.
4. Abaixo da superfície e em ordem de profundidade estão a _____, a _____ e o _____.
5. As células convectivas são evidenciadas através do _____ na superfície do Sol.

6. O _____ é o elemento mais abundante no Sol e o segundo é o _____.
7. Para a produção de energia no núcleo do Sol são necessários _____ para produzir _____.
8. Obtemos informação do interior solar observando os _____. Este estudo é chamado de _____.
9. As manchas solares são _____ por que são mais frias _____.
10. O ciclo de manchas solares é de _____ e o ciclo magnético global é de _____.
11. O Sol possui uma _____ com um período de rotação de _____ e _____.
12. Os flares solares podem ser explicados pelo processo de _____.
13. Estruturas observadas na coroa solar: _____ as _____ e os _____.
14. As _____ são gigantescas explosões de plasma na forma de bolhas.
15. Da interação do vento solar com a magnetosfera da Terra ocorrem as _____.

RESPOSTAS

- (1) fotosfera; (2) cromosfera, coroa solar; (3) região de transição; (4) zona convectiva, zona radiativa, núcleo; (5) padrão granular; (6) hidrogênio, hélio; (7) 4 núcleos de hidrogênio, 1 núcleo de hélio; (8) sismos solares, heliosismologia; (9) mais escuras, que a redondeza; (10) 11 anos, 22 anos; (11) rotação diferencial, 34 dias nos polos, 25 dias no equador; (12) reconexão magnética; (13) elmos, plumas polares, arcos coronais; (14) ejeções de massa coronal; (15) auroras polares.

CAPÍTULO 7 - ESTRELAS

Jane Cristina Gregorio Hetem

OBJETIVOS

São apresentadas as características das estrelas e a sua evolução, com o objetivo de melhor compreender o passado e prever o futuro do Sol. Além disso, estudam-se as condições físicas do interior estelar que propiciam a formação dos elementos químicos e a produção de energia, questões fundamentais para a vida. O capítulo se divide em quatro partes: contexto histórico; propriedades; classificação; e evolução, – nas quais são abordadas questões básicas como: O que é uma estrela? Onde se encontram as estrelas? Como se avaliam suas características? Elas são todas iguais? São imutáveis?

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA, TEMPERATURA E COR

As características das estrelas se avaliam pelo estudo da luz por elas emitidas, ou seja a radiação eletromagnética, que pode ser observada em diferentes faixas espectrais: ultravioleta, visível, infravermelho, ondas de rádio, etc. A faixa do visível cobre comprimentos de onda desde o violeta (390 nm) até o vermelho (720 nm). Os espectros estelares revelam suas condições físicas, como temperatura e densidade, por meio das medidas de linhas espectrais, as quais são formadas pela emissão ou absorção de fótons, causando mudanças na quantidade de energia que ocorrem no interior de um determinado átomo.

Quando uma fonte de luz se movimenta em relação ao observador, a radiação emitida por ela sofre efeito Doppler. Se o movimento é de aproximação, o comprimento de onda observado é menor que o emitido, ocorrendo um “desvio para o azul” (do inglês *blueshift*). Em situação oposta, as linhas espectrais sofrem “desvio para o vermelho” (*redshift*), pois o comprimento de onda observado é maior que o emitido no caso de afastamento da fonte emissora.

O espectro de radiação de uma estrela depende de sua temperatura e pode ser expresso pela lei de Planck (radiação de corpo negro), que fornece a intensidade da radiação em função do comprimento de onda. A cor da estrela pode ser indicada pelo comprimento de onda que corresponde ao máximo de intensidade, expressa pela aproximação de Wien: $\lambda = 0,29/T$, onde o comprimento de onda (λ) é dado em cm e a temperatura superficial (T) é dada em Kelvin. Desta forma, estrelas mais quentes têm o máximo de radiação na região espectral entre o azul e o ultravioleta (menores λ s), enquanto que as mais frias têm cor entre o vermelho e o infravermelho (maiores λ s).

LUMINOSIDADE, MAGNITUDE APARENTE E DISTÂNCIA

O fluxo de energia somado em todos comprimentos de onda corresponde ao fluxo total emitido por uma estrela, que é proporcional a temperatura elevada à quarta potência. A luminosidade estelar equivale à potência irradiada, ou seja, variação da energia em função do tempo, e pode ser expressa por $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$, onde σ é a constante de Stefan-Boltzman, R é o raio e T a temperatura da estrela.

A magnitude aparente da estrela é determinada de acordo com uma escala logarítmica e invertida, dada por $m = C - 2,5 \log F$, onde C é uma constante definida pelo sistema fotométrico adotado e F é o fluxo aparente, o qual diminui com o quadrado da distância:

$F = L / 4\pi d^2$. A magnitude absoluta M representa o brilho que a estrela teria caso ela fosse colocada a uma distância de 10pc. Assim, pelo módulo de distância, dado por $m - M = 5 \log (d/10)$, determina-se a distância (d) em parsec.

A unidade parsec (1 pc = 3,3 anos-luz ou $3,1 \times 10^{16}$ m) foi definida em função do ângulo paralático p (medido em segundos de arco). Para distâncias de até 100 pc é possível medir a separação angular da imagem de um mesmo objeto, observado em diferentes posições no céu a partir de diferentes pontos de vista, ou seja, pelo efeito da paralaxe. Assim, a distância pode ser obtida por $d(\text{pc}) = 1/p(\text{''})$ ou $d(\text{UA}) = 1/p(\text{rd})$, onde UA é Unidade Astronômica (distância média da Terra ao Sol). Para medidas de distâncias maiores, até outras galáxias, utiliza-se a comparação do brilho de estrelas variáveis com seu período de pulsação, observado em estrelas do tipo Cefeidas.

CLASSIFICAÇÃO E PRODUÇÃO DE ENERGIA

As estrelas são classificadas de acordo com suas temperaturas e seus raios, que definem respectivamente os tipos espectrais (OBAFGKM) e suas classes de luminosidade (Ia, Ib, II, III, IV e V). As estrelas dos primeiros tipos (O, B) são as mais quentes, apresentando cor azulada, enquanto as mais frias e avermelhadas são as dos últimos tipos (K, M). As estrelas mais luminosas são as supergigantes (classes I e II) e as gigantes (classes III e IV), pois têm maiores raios – maiores superfícies emissoras – quando comparadas às anãs (classe V). Essas categorias ocupam regiões bem definidas no Diagrama H-R, um gráfico em que se comparam luminosidade, temperatura e raio das estrelas, parâmetros que dependem de seu estágio evolutivo.

Durante a maior parte de suas vidas, as estrelas ocupam uma faixa do Diagrama H-R chamada sequência principal (classe V). Nessa fase elas permanecem em equilíbrio, enquanto a força gravitacional, que tende a contrair a estrela, é compensada pela pressão de radiação gerada no núcleo estelar. Essa radiação vem da energia termonuclear, fornecida basicamente pela fusão de quatro átomos de hidrogênio, formando um átomo de hélio e liberando fótons (pacotes de energia).

Quando termina o hidrogênio do núcleo mais central da estrela – completamente constituído de hélio – a fusão de hidrogênio passa a ocorrer na camada subsequente. Caso a temperatura do núcleo central não seja suficientemente alta para a fusão de átomos de hélio – que se transformariam em carbono – a pressão de radiação deixa de ser gerada no centro da estrela. A energia sendo gerada nas camadas acima do núcleo central provoca um desbalanço geral e a estrela tem suas características alteradas, passando a ocupar uma outra posição no diagrama H-R. Ou seja, ela sai da sequência principal e começa a evoluir para estágios finais de sua vida.

EVOLUÇÃO

Como as estrelas massivas são mais luminosas, elas têm uma alta taxa de produção de energia e consomem seu material muito mais rapidamente que as estrelas de baixa massa. Suas altas temperaturas centrais permitem a fusão nuclear, levando à formação de elementos mais pesados, até chegar no ferro, pelo processo conhecido por nucleossíntese estelar quiescente. A massa também é um fator determinante para as etapas finais da vida da estrela. O Sol por exemplo, que é considerado uma estrela de baixa massa, depois de sair da sequência principal passará pela fase de Gigante Vermelha. Depois, suas últimas camadas serão ejetadas de forma lenta e a estrela vai se caracterizar como uma Nebulosa Planetária, apresentando duas componentes, uma mais externa e difusa (gás ejetado, que se dispersa com o tempo) e a outra central e compacta (núcleo estelar mais denso e quente). O objeto central é uma Anã Branca, que vai esfriar continuamente até não apresentar mais brilho algum (anã negra), pois não ocorrem mais processos de produção de energia.

Estrelas mais massivas que o Sol podem explodir em supernovas e terminar como estrelas de nêutrons, objetos muito compactos. Apesar de muito quentes, o pequeno tamanho as torna pouco luminosas no visível, sendo melhor detectadas por sua emissão rádio. O fluxo de radiação das estrelas de nêutrons é emitido por feixes colimados pelas linhas de campo magnético. Quando o eixo de rotação não é paralelo ao eixo do campo magnético, o feixe de radiação que passar pela linha de visada de um observador vai ser recebido na forma de pulsos, dada a alta rotação da estrela de nêutrons. Nesses casos, essas estrelas são observadas como Pulsares.

Quando a explosão da supernova é tão catastrófica a ponto de o objeto restante ser muito pequeno e muito denso, o objeto deforma o espaço (seu campo de atuação gravitacional) de tal forma que nem a luz consegue escapar de seus arredores, daí o nome Buraco Negro.

Em resumo, qual é a importância das estrelas em nossas vidas? O Sol, nossa estrela, nos fornece energia. A Terra e os outros planetas são provenientes da mesma nuvem-mãe que formou o Sol. Essa nuvem foi enriquecida de elementos químicos produzidos pela nucleossíntese estelar. Esse material foi repassado para o meio interestelar na ocasião da morte de uma estrela de uma geração anterior. Ou seja, nossa vida é produto das estrelas.

TESTES

1. Assinale nas alternativas a seguir Verdadeira (V) ou Falsa (F). Justifique sua resposta no caso das falsas:

- (a) Ao atravessar um prisma, a luz branca é decomposta em diferentes cores na faixa visível, que corresponde a comprimentos de onda da ordem de 10^{-3} nanômetros. ()
- (b) Devido ao efeito Doppler, o comprimento de onda observado será maior do que o emitido por uma fonte em aproximação. ()
- (c) Devido ao efeito Doppler, o comprimento de onda observado será maior do que o emitido por uma fonte em afastamento. ()
- (d) A curva de corpo negro que corresponde à radiação de uma estrela de 30.000 K tem um máximo de intensidade na região do infravermelho. ()
- (e) A curva de corpo negro que corresponde à radiação de uma de 6.000 K tem um máximo de intensidade na região visível. ()
- (f) O comprimento de onda que corresponde ao máximo de intensidade para a estrela de 29.000 K é de 100nm. ()

(g) Nas estrelas, as temperaturas superficiais elevadas correspondem a cores mais avermelhadas, enquanto baixas temperaturas correspondem a cores mais azuladas. ()

2. Assinale a alternativa falsa:

- (a) O brilho aparente depende da distância da estrela.
- (b) Quanto maior o fluxo emitido pela estrela, maior sua magnitude aparente.
- (c) Quanto maior a magnitude aparente, menor é o brilho aparente.
- (d) Uma diferença de uma magnitude implica em razão de brilho de 2,512.
- (e) A magnitude aparente de Betelgeuse é 0,8 mag e a do Sol é -26,8 mag.

3. Preencha as lacunas nas seguintes questões sobre evolução estelar:

- (a) Na reação termonuclear básica nas estrelas da sequência principal, quatro átomos de _____ se fundem para formar um núcleo de _____, sendo produtos intermediários _____ e _____.
- (b) Na sequência principal, o tempo de vida de anãs _____, estrelas frias de baixa massa, é da ordem de _____ de anos.
- (c) A fase evolutiva – no final da vida da estrela – na qual ela tem duas componentes (núcleo central muito quente e pequeno e uma camada de material difuso ejetado) é chamada Nebulosa _____.
- (d) Uma estrela do tipo _____ Branca é um objeto compacto, na fase final da evolução estelar, que tem o tamanho da Terra e metade da massa do Sol.
- (e) Estrelas com mais que 8 massas solares têm temperatura central alta o suficiente para fusão de elementos pesados até o _____, a partir do qual a fusão deixa de ser exotérmica.
- (f) A Nebulosa do Caranguejo, registrada pelos chineses em 1054, expansão violenta das camadas _____ de uma estrela massiva, corresponde aos restos da explosão de uma _____.
- (g) Pulsar é uma _____ cujo eixo de rotação não coincide com o feixe de radiação emitida na forma bipolar.

RESPOSTAS

Teste 1: (a) F. Justificativa a faixa do visível vai de 390 a 720 nm; (b) F. Justificativa: no caso de aproximação o comprimento de onda observado é menor que o emitido; (c) V; (d) F. Justificativa: intensidade é máxima no ultravioleta; (e) V; (f) V; (g) F. Justificativa: estrelas quentes são azuladas e as frias são avermelhadas.

Teste 2: (b).

Teste 3: (a) Hidrogênio, hélio, deutério e trítio; (b) vermelhas; trilhões; (c) Planetária; (d) Anã; (e) Ferro; (f) externas; supernova; (g) Estrela de nêutrons.

CAPÍTULO 8 - A VIA LÁCTEA

Walter J. Maciel

OBJETIVOS

O objetivo deste capítulo é apresentar a nossa galáxia, a Via Láctea, também referida como Galáxia, através de seus principais componentes: estrutura, formação e evolução. Na parte introdutória é dada uma visão geral da Via Láctea, em comparação com outras galáxias. É feito um resumo dos principais modelos da Via Láctea até o início do século vinte. A parte seguinte inclui os principais constituintes da Via Láctea, e suas características mais importantes. A próxima parte trata do problema das distâncias, com um resumo dos principais métodos de cálculo de distâncias de estrelas e nebulosas. Em seguida, é estudado com mais detalhes o meio interestelar, compreendendo essencialmente o gás e a poeira interestelares. O estudo da cinemática da Galáxia, em particular o movimento ao longo do plano galáctico, é feito na parte seguinte, após a qual são consideradas as populações estelares e seus critérios de classificação. Em seguida, trata-se de maneira elementar do processo de formação de estrelas, em particular em termos do comprimento e da massa de Jeans. A parte final resume os principais resultados dos modelos mais recentes da formação e da evolução da Galáxia.

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Inicialmente é apresentada a estrutura geral da Via Láctea, como observada a olho nu. Destaca-se o fato de que podemos observar milhões de galáxias no céu, com formas e tamanhos diferentes, sendo a Via Láctea apenas uma galáxia comum, semelhante a muitas. O Sistema Solar está contido na Via Láctea, o que torna mais difícil estudar algumas das propriedades da nossa galáxia. Por esta razão, o estudo da Galáxia deve ser feito em comparação com outras galáxias.

A forma da Via Láctea pode ser associada a um disco, com altura bem menor que o diâmetro. A primeira característica a ser notada é a faixa plana central, também observada a olho nu. A segunda característica que podemos observar é um núcleo brilhante, presente também em muitas outras galáxias. Finalmente, podemos notar na faixa central a presença de manchas escuras. Sabemos que nestas regiões ocorre uma concentração de poeira e esta poeira absorve parcial ou totalmente a luz das estrelas localizadas naquela direção. O *disco* achatado pode ser dividido em duas componentes, o *disco espesso* e o *disco fino*, e as demais componentes são um *bojo* bem definido e um *halo* composto basicamente por estrelas. Há evidências de uma *barra* na região central, de onde partem braços espirais, que podem ser vistos detalhadamente em outras galáxias, mas apresentam complicações no caso de nossa própria Galáxia.

Em seguida, apresenta-se uma breve revisão de modelos clássicos da Via Láctea, em particular os modelos de Thomas Wright, William Herschel e Kapteyn. Esses modelos tentavam reproduzir o aspecto achatado que pode ser visto em observações feitas a olho nu. Entretanto, uma vez que as distâncias das estrelas não eram conhecidas, o máximo que os modelos podiam fazer era obter uma descrição qualitativa baseada em contagens de estrelas. Além disso, a absorção interestelar afeta a distribuição das estrelas e suas distâncias, e só foi bem compreendida a partir da década iniciada em 1930. Portanto, os modelos iniciais previam uma Galáxia muito menor do que o tamanho real, pois a extinção interestelar impedia totalmente a observação das estrelas em diversas direções. Esta controvérsia somente foi resolvida no início do século vinte, a partir do estudo dos *aglomerados globulares*.

Finalmente, discute-se que nossa Galáxia não está isolada no Universo. Muitas galáxias pertencem a grupos chamados *aglomerados de galáxias*, e a Via Láctea faz parte de um grupo chamado *Grupo Local*, que contém cerca de 40 a 50 objetos, entre os quais as Nuvens de Magalhães e a galáxia de Andrômeda, uma galáxia espiral muito parecida com a Via Láctea.

8.2 COMPONENTES DA VIA LÁCTEA

Neste item são discutidos os principais constituintes da Via Láctea. As *estrelas* são provavelmente o principal componente da Via Láctea, armazenando a maior parte de sua massa visível. Elas podem ser *estrelas de campo* ou *estrelas de aglomerados*, que podem ser do tipo *globular* ou *galácticos*, dependendo de suas dimensões, localização na Galáxia e conteúdo estelar. As estrelas emitem luz, ou radiação, criando um *campo de radiação*, composto pelos fótons emitidos por elas.

As *nebulosas galácticas* são essencialmente nuvens de gás e poeira, geralmente associadas com estrelas. Algumas são *nebulosas difusas* ou *regiões HII*, isto é, regiões em que o hidrogênio está ionizado e estão sempre associadas com estrelas muito jovens e brilhantes. Nestas nebulosas podem também ser observadas regiões escuras, como a nebulosa da Cabeça de Cavalo, que contém uma grande densidade de poeira, que absorve a luz das estrelas. Quando o gás e a poeira estão associados com estrelas quentes, mas não quentes o suficiente para ionizar os átomos de hidrogênio, temos as chamadas *nebulosas de reflexão*, como as Plêiades, na constelação do Touro. Um outro tipo de nebulosa são as *nebulosas planetárias*. Estes objetos têm dimensões muito menores que as regiões HII, e foram ejetadas pela estrela progenitora, sendo um aspecto do estágio final da vida das estrelas mais velhas e de pequena massa. Um terceiro tipo de nebulosa, também ionizada, são os *restos de supernovas*, ou *remanescentes de supernovas*, como a nebulosa do Caranguejo. Estas nebulosas são também associadas com o final da vida das estrelas, mas neste caso são estrelas de grande massa, que explodem como supernovas.

A distinção entre os diversos tipos de nebulosas, e entre as nebulosas e galáxias externas, somente foi possível a partir do desenvolvimento da espectroscopia astronômica. Uma vez determinadas as condições físicas das nebulosas fotoionizadas, podemos determinar sua composição química com uma precisão relativamente alta. Esses resultados são interessantes para o estudo da evolução química da Galáxia.

O próximo componente é o gás interestelar, que ocupa todo o espaço do disco da Galáxia e de outras galáxias espirais. Ele pode ser detectado por meio de linhas de absorção na direção de estrelas quentes. As linhas espectrais sofrem um alargamento, e um dos principais mecanismos de alargamento é o efeito Doppler, que depende da temperatura cinética do gás que causa a absorção. Nas nuvens interestelares a temperatura é muito baixa, da ordem de 100 K.

Já as estrelas têm atmosferas muito mais quentes, acima de 2.500 K. Assim, o alargamento das linhas interestelares é muito menor do que o das linhas atmosféricas, permitindo a distinção entre as duas linhas.

A poeira interestelar é composta por *grãos sólidos*, com dimensões tipicamente de algumas dezenas de angstroms até microns. Cada grão contém um grande número de átomos, cuja natureza pode ser desvendada a partir basicamente de três fontes de informação: a *extinção interestelar*, a *polarização interestelar* e a *emissão de energia*. A principal informação sobre a extinção interestelar está contida na *curva de extinção*. Comparando a curva de extinção com os resultados previstos para diferentes composições químicas, podemos também ter uma ideia da composição química dos grãos, que inclui grafite, silicatos, SiC, gelos sujos, etc.

No espaço interestelar existem também partículas de alta energia que o atravessam, chamadas *raios cósmicos*, compostos basicamente de prótons, elétrons, núcleos de hélio e outros elementos. São gerados em eventos energéticos tanto em nossa Galáxia como extragalácticos: explosões solares, explosões de supernovas, núcleos ativos de galáxias. Finalmente, no disco da Galáxia observa-se um campo magnético de baixa intensidade. A origem deste campo é vivamente debatida, assim como sua influência na formação e equilíbrio das nuvens interestelares.

8.3 DISTÂNCIAS

Um dos problemas básicos no estudo da astrofísica da Galáxia é a determinação de distâncias. Entre os principais métodos atualmente à disposição podemos destacar os seguintes: paralaxe trigonométrica, métodos cinemáticos, distâncias espectroscópicas e relação período-luminosidade. A paralaxe trigonométrica é praticamente o único método direto de que dispomos. O satélite Hipparcos (*High Precision Parallax Collecting Satellite*), lançado em 1989, consegue medir paralaxes de até $p = 0.001''$, e pode ser aplicado a estrelas com distâncias abaixo de 1.000 pc. Mais recentemente, está em desenvolvimento o projeto GAIA, o qual deverá ser capaz de alcançar paralaxes cem vezes menores, ou seja, $p = 0.00001''$, correspondentes a distâncias de 100 kpc, portanto da ordem de grandeza das dimensões da Galáxia.

Alguns métodos de determinação de distâncias das estrelas baseiam-se em suas propriedades cinemáticas, isto é, em seus movimentos observados na linha de visada (velocidade radial) e no plano do céu (velocidade tangencial, movimento próprio). Existem vários métodos de determinação de distâncias como as *paralaxes estatísticas* e *paralaxes seculares* que baseiam-se em medidas do movimento próprio de grupos de estrelas ao longo dessas componentes. Aplicam-se portanto a conjuntos de estrelas, sendo métodos estatísticos, em contraste com as paralaxes trigonométricas, que são basicamente medidas individuais.

Um método bastante útil para calcular distâncias astronômicas é o método das *paralaxes espectroscópicas*. Este método inclui uma série de procedimentos baseados nas características espectrais observadas das estrelas. Além do tipo espectral, é necessário conhecer a classe de luminosidade da estrela, o que pode ser feito, por exemplo, a partir de sua gravidade, obtida também de suas características espectrais.

Um método extremamente poderoso para determinar distâncias é o método baseado na relação entre o *período* e a *luminosidade* de algumas estrelas variáveis, em particular as variáveis do tipo cefeida. A aplicação deste método é, em princípio, muito simples: basta medir o período de variação luminosa da estrela para obter a luminosidade, e portanto sua distância.

8.4 O MEIO INTERESTELAR

O meio interestelar é um dos principais constituintes da Galáxia, tendo um papel fundamental na formação das estrelas em nuvens interestelares, e na evolução química da Galáxia. A composição do meio interestelar é extremamente complexa, mas pode ser simplificada considerando que contém essencialmente *gás e poeira*. Podemos caracterizar o meio interestelar a partir de sua densidade. As regiões interestelares podem ser regiões interestelares densas e difusas e, em ambos os casos, as densidades são muito mais baixas que em outros objetos astronômicos. Essas regiões estão imersas em um meio internuvens, ainda mais diluído.

As diversas fases que compõem o meio interestelar apresentam um certo equilíbrio, no sentido de que a energia armazenada em cada fase é semelhante. Entretanto, este fato não exclui a possibilidade de haver processos dinâmicos em atuação.

Cerca de duas centenas de moléculas são conhecidas no meio interestelar, em especial nas nuvens densas, ou nuvens moleculares, sítios de formação estelar. Elas variam de simples moléculas e radicais diatômicos até longas cadeias contendo mais de dez átomos. Parte considerável dessas moléculas inclui átomos de C e H, os mesmos que constituem as principais moléculas orgânicas associadas com a vida.

8.5 CINEMÁTICA DA GALÁXIA

A rotação galáctica é expressa pela curva de rotação, que contém a velocidade linear de rotação em função da distância ao centro galáctico, projetada sobre o plano. A velocidade angular está relacionada com a velocidade linear. Dois métodos podem ser geralmente usados para a obtenção da curva de rotação: (i) observações ópticas dos movimentos das estrelas e regiões HII, limitadas a alguns kpc do Sol pela absorção interestelar, e (ii) observações em rádio da linha de 21 cm do H e da molécula CO.

Considerando os movimentos no plano galáctico admitindo que as órbitas das estrelas e nebulosas contidas neste plano sejam circulares, as equações da rotação galáctica podem ser facilmente obtidas, tanto para a velocidade radial como para a velocidade tangencial. Inicialmente analisamos o comportamento da velocidade radial no caso simples de uma rotação rígida. Nesse caso, a velocidade angular é constante, a velocidade radial é nula, pois todos os objetos deslocam-se com a mesma velocidade angular. A velocidade de rotação aumenta linearmente com a posição, e o coeficiente angular desta relação é a velocidade angular. No caso de órbitas keplerianas, podemos também obter com facilidade as equações da rotação galáctica para órbitas circulares. Neste caso a velocidade de rotação cai com a raiz quadrada da distância ao centro. A massa da Galáxia interna ao raio solar pode então ser estimada como 7.4×10^{10} massas solares. Esse resultado se aplica à região interna ao raio solar. Incluindo a região mais externa, valores da ordem de 2×10^{11} massas solares são obtidos.

As equações da rotação galáctica podem ser simplificadas no caso de objetos próximos ao Sol. A análise pioneira deste problema foi feita por Jan Oort em 1927, e as equações correspondentes envolvem as constantes de Oort A e B. Estas constantes estão relacionadas com os parâmetros da rotação no círculo solar, de modo que esses parâmetros podem ser obtidos conhecendo o valor das constantes. Os resultados obtidos mostram que as órbitas das estrelas no plano galáctico não são keplerianas.

A partir de medidas da velocidade radial é possível obter a curva de rotação, uma vez que a distância seja conhecida. Com este procedimento é possível obter a curva de rotação para distâncias galactocêntricas até cerca de 16 a 18 kpc do centro. Notamos que a velocidade fica

aproximadamente constante para valores altos da distância galactocêntrica, comportamento muito diferente do previsto para órbitas keplerianas.

A curva de rotação observada é consistente com uma rotação rígida nas regiões internas da Galáxia. Para grandes distâncias galactocêntricas, a explicação mais aceita para uma curva de rotação plana seria a existência de matéria não luminosa, (*dark matter*). Nesse caso, para regiões mais distantes do círculo solar, a matéria luminosa que constitui as estrelas seria uma pequena fração da massa total da Galáxia. A curva de rotação da Galáxia pode ser interpretada em termos de três componentes: (1) a região esferoidal, onde se encontra o bojo, responsável pela rotação rígida observada; (2) a região do disco próxima ao círculo solar; e (3) a região esférica mais distante, responsável pela parte plana da curva de rotação.

8.6 ESTRUTURA GALÁCTICA E BRAÇOS ESPIRAIS

Observações na linha de 21 cm do H permitem mapear a estrutura do disco galáctico em determinadas direções com grande precisão. Da mesma forma, regiões HII associadas com estrelas quentes, cujas distâncias podem ser bem determinadas, contribuem significativamente para o mapeamento do disco, em especial dos braços espirais. Sequências de perfis de emissão de H podem ser obtidas para uma dada longitude galáctica, variando a latitude, ou vice-versa, de modo que as estruturas das nuvens de H do disco galáctico podem ser mapeadas. Como esses objetos são geralmente muito jovens, com idades abaixo de 107 anos, esta região do disco pode ser caracterizada como sendo de população I, ou população I jovem. Segundo esses resultados, nossa Galáxia é uma espiral com três braços, contendo possivelmente uma barra de 2 a 4 kpc, ligando o bojo ao disco.

A existência dos braços espirais como entidades físicas coloca alguns problemas, pois eles deveriam ser destruídos ou “enrolados” pela rotação galáctica diferencial, o que não ocorre. Portanto, ou existe um mecanismo capaz de compensar o efeito da rotação, ou os braços são equivalentes a zonas de compressão de ondas estacionárias em um sistema de referência em rotação. Existe uma teoria, chamada teoria das ondas de densidade, proposta na década de 1960, que parece resolver boa parte dos problemas associados aos braços. Nesta teoria, os máximos de densidade, ou “cristas” da onda, giram em torno do centro galáctico com uma velocidade angular essencialmente constante, diferente da velocidade angular da matéria, que depende da rotação diferencial e varia com a distância ao centro.

8.7 POPULAÇÕES ESTELARES

O conceito de populações estelares foi desenvolvido inicialmente por Walter Baade na década de 1940, a partir de observações da galáxia de Andrômeda. Segundo Baade, os objetos se distribuíam em duas populações, a população I, composta de objetos mais jovens, localizados no disco, e a população II, contendo estrelas mais velhas, localizadas principalmente no bojo e no halo das galáxias. Para a nossa galáxia, podemos caracterizar os objetos de população I, por exemplo as estrelas azuis, como objetos jovens, enriquecidas em elementos pesados, relativamente próximos ao plano galáctico, em movimento de rotação com baixas dispersões de velocidades. Em contraposição, os objetos mais velhos, avermelhados, pobres em metais e distantes do plano galáctico, com órbitas mais excêntricas, seriam tipicamente de população II. Vemos então que os principais critérios de classificação envolvem a idade, a composição química, a distribuição espacial e características cinemáticas. São frequentemente usados 5 diferentes tipos: população I extrema, I velha, disco, II intermediária e II halo.

A abundância média dos principais elementos químicos no sistema solar é bem conhecida, e pode ser usada como padrão de comparação com outros objetos da Galáxia e de outras galáxias. Normalmente, os astrofísicos chamam de “elementos leves” o H, He, Li, Be e B, e de “metais” todo o resto. Por isto, a abundância dos elementos mais pesados a partir do C é geralmente chamada de “metallicidade”. Diversas relações envolvendo as metalicidades podem ser desenvolvidas, como a distribuição de metalicidades no disco, bojo e halo galácticos e a relação entre a idade dos objetos e sua metalicidade. O enriquecimento constante do meio interestelar com os produtos da nucleossíntese estelar sugere que a metalicidade média deve aumentar com o tempo, produzindo uma relação idade-metalicidade. A idade do disco galáctico está no intervalo de 10-15 Gano, com um valor médio de 13 Gano, e o Sol tem uma escala de tempo na sequência principal de 10 Gano. Outra relação importante é a relação entre a metalicidade e as abundâncias relativas dos elementos alfa, como o oxigênio. O Fe é produzido essencialmente nas supernovas de tipo Ia, formadas por estrelas menos massivas, e portanto com tempos de evolução na sequência principal mais lentos. Os elementos- α , como O, Ne, Mg, Si e S, ao contrário, são produzidos principalmente nas supernovas de tipo II, formadas por estrelas mais massivas, de evolução mais rápida. Isto implica um atraso na produção de Fe, de modo que a razão $[\alpha/\text{Fe}]$ pode ser usada como um relógio cósmico. Esta relação fornece um vínculo importante para os modelos de evolução química.

8.8 FORMAÇÃO DE ESTRELAS

As nuvens moleculares gigantes (GMC, de *Giant Molecular Clouds*) são verdadeiros “berçários” de estrelas, onde objetos jovens e brilhantes estão imersos em nuvens de gás e poeira. Entretanto, a teoria da formação estelar a partir do colapso e fragmentação dessas nuvens ainda tem muitos pontos obscuros, e a formação estelar é, de fato, o estágio menos conhecido no estudo da evolução das estrelas. A ideia básica da formação estelar considera que estágios sucessivos de fragmentação e colapso são eficientes para reduzir as massas das nuvens moleculares até as dimensões estelares. Este processo é denominado fragmentação hierárquica, e é influenciado pelas condições físicas da nuvem, como sua massa, dimensões, etc. As estrelas se formam a partir de nuvens interestelares, por um processo de instabilidade gravitacional que leva à contração da nuvem, até que as regiões centrais atinjam densidades e temperaturas suficientes para a ignição das reações nucleares. Para uma nuvem homogênea, infinita e em repouso, as instabilidades levam à contração gravitacional se a nuvem tiver dimensões superiores ao comprimento de Jeans, que pode ser definido em termos das características físicas da nuvem interestelar. Aplicando essa condição a uma nuvem esférica, podemos mostrar que a massa envolvida deve ser superior à massa de Jeans, a massa associada ao comprimento de Jeans. Nesse caso, a instabilidade se propaga, havendo a formação de um objeto colapsado em uma escala de tempo da ordem do tempo de queda livre.

A formação estelar permite formar estrelas com massas diferentes, mas formam-se muito mais estrelas de massas pequenas ou intermediárias (abaixo de 3 massas solares aproximadamente) do que estrelas massivas e brilhantes. Esta condição pode ser expressa por meio da IMF ou *initial mass function*, a distribuição das massas das estrelas ao nascer. Além da IMF, precisamos conhecer também a taxa de formação estelar SFR (de *star formation rate*), que é essencialmente a massa total de estrelas formadas por unidade de tempo. Em geral consideramos a IMF como uma função dependente apenas da massa das estrelas,

enquanto que a taxa de formação estelar é considerada como uma função do tempo, ou eventualmente admitida constante.

8.9 FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DA GALÁXIA

O estudo da formação e evolução da Galáxia começa pelas considerações sobre a formação do universo, uma vez que após o Big Bang iniciou-se um resfriamento geral enquanto o universo se expandia. O conceito de populações estelares é consistente com um colapso inicial rápido na Galáxia, quando foi formada a componente esferoidal (halo) e a condensação central (bojo). Como as estrelas formam-se a partir do gás interestelar, a formação estelar no halo é atualmente limitada pela escassez de gás e poeira. Dotada de um movimento de rotação, a nebulosa pregaláctica sofreu um segundo colapso em direção ao plano galáctico, dando origem ao disco. Após a formação do disco, perturbações de origem gravitacional, possivelmente complicadas por forças magnéticas, deram origem à estrutura espiral.

As diferenças na composição química das populações estelares da Galáxia ajustam-se também a este esquema. No chamado “modelo padrão”, foram inicialmente formados os elementos leves D, ^3He , ^4He , e ^7Li . Os elementos pesados, como C, N, O, etc., tiveram sua origem no interior das estrelas. Em consequência, os objetos mais velhos do halo (população II) devem ter baixo conteúdo de elementos pesados, o que é confirmado pelas observações. À medida que a evolução se processa, o gás enriquecido é devolvido ao meio interestelar pelas supernovas, nebulosas planetárias e outros processos de perda de massa, de modo que os objetos mais jovens apresentam maior abundância de elementos pesados.

As estrelas do halo têm altas dispersões de velocidades, e são pobres em metais por um fator da ordem de 10 ou superior, com relação ao Sol. Desde o trabalho clássico de Eggen, Lynden-Bell e Sandage em 1962, este fato tem sido interpretado como evidência de que o halo se formou primeiro, antes que o enriquecimento pelas mortes das estrelas massivas tivesse ocorrido. Entretanto, esse cenário “monolítico” para a formação da Galáxia sofreu muitas modificações nos últimos 40 anos. Um aspecto importante da formação da Galáxia, que distingue os modelos atuais dos modelos iniciais, refere-se aos processos de *infall*, ou queda de matéria no disco e halo galácticos. Parte do material das galáxias vizinhas pode interagir com o gás da Galáxia, incrementando os processos de formação estelar.

A evolução da Galáxia compreende a evolução dinâmica e a evolução química. Estes aspectos evolutivos estão correlacionados e ocorrem ao mesmo tempo em um determinado objeto. Em particular, a evolução química da Galáxia estuda a composição química das estrelas, gás, etc., em termos da produção dos elementos pelas estrelas e do processo de ejeção e mistura dos elementos no meio interestelar. Os modelos de evolução química devem satisfazer uma série de vínculos de natureza observacional. Em princípio, os vínculos observacionais devem ser independentes de hipóteses sobre a natureza dos modelos, mas na prática o estabelecimento destes vínculos tem suas próprias incertezas. Os principais vínculos relacionados com os modelos de evolução química são basicamente as abundâncias no Sistema Solar, a relação idade-metalicidade, a distribuição de metalicidades nas diversas populações estelares da Galáxia, as abundâncias relativas, em especial dos elementos- α , a distribuição radial das abundâncias, a distribuição radial do gás e da taxa de formação estelar (SFR), a fração atual de gás observada, as taxas de formação e morte das estrelas, em particular das supernovas de tipos Ia e II, responsáveis por parte considerável da nucleossíntese dos elementos pesados, e a razão de enriquecimento entre He e elementos pesados.

TESTES

- 1) A maior parte da massa visível observada na Galáxia está:
- (a) Nas nebulosas difusas.
 - (b) Na poeira interestelar.
 - (c) Nas estrelas.
 - (d) Nos raios cósmicos.
 - (e) No campo magnético galáctico.
- 2) A principal diferença entre as regiões HII e as nebulosas planetárias é:
- (a) As regiões HII são mais ionizadas.
 - (b) As nebulosas planetárias são mais massivas.
 - (c) As nebulosas planetárias estão associadas com estrelas mais jovens.
 - (d) As regiões HII são originadas de estrelas de baixa massa.
 - (e) As nebulosas planetárias são originadas de estrelas de baixa massa.
- 3) Assinale a alternativa incorreta:
- (a) As estrelas jovens tem um movimento de rotação no plano galáctico.
 - (b) As estrelas do halo não participam da rotação galáctica.
 - (c) Os objetos do disco fino são geralmente jovens.
 - (d) O halo galáctico é uma região de intensa formação estelar.
 - (e) O bojo galáctico é uma estrutura predominantemente velha.
- 4) Assinale a alternativa correta:
- (a) A paralaxe trigonométrica permite obter distâncias precisas.
 - (b) Estrelas cefeidas são bons indicadores de distância.
 - (c) O satélite Hipparchos permite obter distâncias até 1 kpc do Sol.
 - (d) Métodos cinemáticos requerem a medida das velocidades das estrelas.
 - (e) Todas as alternativas estão corretas.
- 5) Uma estrela tem paralaxe $p = 0.1''$. Sua distância até nós em parsecs e anos-luz é:
- (a) 0.1 pc e 0.32 ano-luz.
 - (b) 32.6 pc e 10 anos-luz.
 - (c) 10 pc e 32.6 anos-luz.
 - (d) 10 pc e 3.26 anos-luz.
 - (e) Nenhuma das respostas acima.

RESPOSTAS

1 (c), 2 (e), 3 (d), 4 (e), 5(c).

CAPÍTULO 9 - GALÁXIAS

Gastão Bierrenbach Lima Neto

OBJETIVOS

Dar ao aluno uma visão da estrutura do Universo em grande escala a partir do estudo de galáxias e suas propriedades.

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

INTRODUÇÃO: O QUE SÃO GALÁXIAS

A Via Láctea, a galáxia na qual nos encontramos, estende-se como um grande círculo cortando a esfera celeste. Sua aparência é nebulosa e irregular. As Nuvens de Magalhães, a Pequena e a Grande, são observadas aproximadamente na direção do Polo Sul Celeste. A quarta galáxia visível a olho nu é a galáxia da constelação de Andrômeda. Essas galáxias têm em comum o aspecto nebuloso que lhes valeu o nome de nebulosas até a década de 1930, resultado do brilho de bilhões de estrelas. Devido à dificuldade em medir distâncias extragalácticas, se cogitou que as galáxias seriam nebulosas da Via Láctea. Galáxias são associações ligadas pela gravitação compostas de estrelas, gás e poeira interestelar, e de matéria escura.

9.2 DESCOBERTA DAS GALÁXIAS E DA VIA LÁCTEA

As galáxias tiveram sua natureza reconhecida apenas nos anos 1920 do século passado. Até então, eram identificadas apenas como “nebulosas”. Galileu foi o primeiro a reconhecer que a Via Láctea é composta por um vasto número de estrelas em 1609. Em 1716 o astrônomo inglês Edmond Halley discutiu a natureza das “manchas luminosas e nebulosas” do céu. Na metade do século 18, o astrônomo inglês Thomas Wright sugeriu que as estrelas na Via Láctea se distribuíam como uma casca esférica e que as misteriosas nebulosas seriam sistemas semelhantes à Via Láctea. Essa ideia foi abraçada e popularizada pelo filósofo alemão Immanuel Kant. As galáxias eram então confundidas com as nebulosas (gás interestelar que brilha graças à luz das estrelas próximas) presentes nos catálogos de Charles Messier e William Herschel. Lord Rosse foi o primeiro a distinguir os braços espirais em algumas nebulosas no século 19.

Em 1920, existiam duas correntes de pensamento em relação às “nebulosas”. Uma propunha que a Via Láctea era muito grande, com o Sol localizado longe do centro e todas as nebulosas estariam contidas nela. A outra corrente propunha uma Via Láctea pequena, o Sol no centro e as nebulosas espirais e elípticas seriam “universos-ilhas”. Esse debate é considerado

por muitos astrônomos como o início da astrofísica extragaláctica moderna. Edwin Hubble mediu a distância de algumas nebulosas e constatou que são exteriores à Via Láctea. Em 1929, Hubble mostrou que o Universo está em expansão e as galáxias se afastam umas das outras com velocidade proporcional à distância em que se encontram.

9.3 FORMA DAS GALÁXIAS

Edwin Hubble foi o primeiro a propor um sistema de classificação para galáxias em 1926 e aperfeiçoado em 1936. Esse sistema, conhecido como “diapasão” e usado até hoje, divide as galáxias em quatro tipos morfológicos: elípticas, espirais (normais e barradas), lenticulares e irregulares.

As galáxias elípticas e lenticulares foram chamadas por Hubble de “tipo precoce” (*early type*) enquanto que as galáxias espirais e irregulares são de “tipo tardio” (*late type*). Esta terminologia pode sugerir uma sequência evolutiva, mas essa evolução não ocorre. As galáxias elípticas têm aparência de um esferoide sem estruturas notáveis. As Elípticas são classificadas segundo o grau de achatamento: as galáxias com aparência esférica são as *E0* e as galáxias mais achatadas são as *E7*.

Galáxias espirais têm a maior parte das estrelas distribuídas em um disco fino. Na região central as estrelas estão em um arranjo mais esférico, o bojo. No disco das galáxias espirais, nota-se a presença de uma estrutura que lembra braços saindo do bojo. As galáxias espirais são subdivididas em duas classes: as normais e as barradas (estas ganham um *B* no nome). Nas galáxias espirais barradas, os braços espirais começam no final de uma distribuição de estrelas que se assemelha a uma barra. As galáxias *Sa* ou *SBa* são aquelas com os braços mais enrolados e com os bojos mais brilhantes.

As galáxias lenticulares apresentam grande bojo e um pequeno disco sem evidência de braços. As galáxias lenticulares têm a mesma cor das elípticas, razão de serem facilmente confundidas com essas, especialmente quando distantes. As galáxias que não se enquadram em nenhum dos três tipos descritos são classificadas como irregulares. As Nuvens de Magalhães são exemplos de galáxias irregulares.

Várias propriedades físicas se alteram ao longo da sequência de Hubble: razão “massa (luminosidade) do bojo/massa do disco”; razão “massa do gás/massa das estrelas”; cor; taxa de formação estelar.

Cerca de 70% das galáxias brilhantes são espirais: 10% são elípticas, 14% lenticulares e 6% irregulares. Essas porcentagens não levam em conta as galáxias anãs, dificilmente observadas a grandes distâncias. Contudo, as galáxias anãs são as mais abundantes no Universo. A classificação morfológica esbarra em várias dificuldades. Não existe um método analítico, objetivo e automático para classificação morfológica. A morfologia das galáxias também depende da banda espectral em que é observada.

Galáxias Elípticas

Galáxias elípticas contêm pouco gás e poeira no meio interestelar. As maiores galáxias do Universo, que podem ser dez ou mais vezes luminosas que a Via Láctea, são elípticas. Em contraposição, muitas das galáxias anãs também são elípticas. O achatamento observado não é devido à sua rotação, mas sim à anisotropia da distribuição de velocidade das estrelas que as integram. A massa das galáxias elípticas é deduzida a partir de observações do movimento das estrelas, medido pelo efeito Doppler de linhas espectrais. Para as maiores galáxias, com

mais de um trilhão de vezes a massa do Sol, observações da emissão de raios X proveniente do gás muito quente permitem avaliar a sua massa. As galáxias elípticas apresentam em geral uma população estelar velha, o último evento importante de formação estelar se deu há mais de 10 bilhões de anos.

As galáxias elípticas apresentam certas relações entre seus parâmetros fundamentais chamadas relações de escala. Essas relações, além de úteis para determinação da distância das elípticas, dão importantes pistas sobre os processos de formação e evolução de galáxias.

Galáxias Espirais

As galáxias espirais têm parte da matéria, principalmente estrelas e gás e poeira, distribuída na forma de um disco achatado, onde se encontram os braços espirais. Além disso, existem duas componentes esferoidais superpostas ao disco: um bojo central relativamente denso e um halo extenso, cujos centros coincidem com o centro do disco. Estima-se que cerca de um terço das galáxias espirais têm uma barra bem visível. A barra é uma estrutura composta do mesmo material do disco, tendo este nome devido a sua aparência vista de face, parecendo uma barra no meio da galáxia.

As galáxias espirais são subdivididas em quatro tipos (a, b, c, d) e tipos intermediários como ab, bc, cd. Uma forma de determinar o tipo da galáxia espiral é medir a razão de luminosidade do bojo sobre a luminosidade do disco. Esta quantidade chamada “razão bojo/disco” diminui das *Sa* para as *Sd*. Outra forma de classificar as espirais é medindo o ângulo de abertura dos braços espirais. Este ângulo é formado pelo braço da galáxia e um círculo que passa a mesma distância radial. Os braços das galáxias espirais podem ter um desenho muito bem definido e simétrico, são as chamadas galáxias *Grand Design*. Apenas cerca de 10% das espirais são *Grand Design*. Existem galáxias com braços mal definidos, chamadas flocculentas. Os casos intermediários são de galáxias com braços múltiplos ou que se bifurcam.

Os braços espirais em galáxias são perturbações que se propagam no disco galáctico mais ou menos como ondas que se propagam no mar. Os braços mais bem definidos devem ser resultado de perturbações mais intensas. As galáxias *Grand Design* apresentam uma forte tendência a estar próximas de outra galáxia que seria a responsável pela perturbação.

9.3 CURVAS DE ROTAÇÃO

Galáxias espirais têm uma rotação importante, com praticamente todas as estrelas do disco girando na mesma direção. O Sol, por exemplo, orbita o centro Galáctico a cerca de 200 km/s, completando uma volta em aproximadamente 250 milhões de anos. As galáxias têm uma rotação chamada diferencial, e não de corpo rígido: a distâncias variadas do centro o tempo que uma estrela leva para completar uma volta completa é diferente. A Curva de Rotação relaciona a posição de uma estrela e sua velocidade de rotação em torno do centro galáctico e permitem a determinação da massa. Nas partes externas das galáxias, onde a curva de rotação é plana, indica que a massa aumenta com a distância ao centro de forma linear. Enquanto a quantidade de massa aumenta, a quantidade de estrelas diminui nas regiões externas. Isso indica que existe uma grande quantidade de matéria nas galáxias que não podemos observar, a matéria escura. A maior parte da massa das galáxias é a ainda desconhecida matéria escura.

9.4 DISTRIBUIÇÃO EM GRANDE ESCALA

A distribuição de matéria no Universo é uma questão relacionada à cosmologia: como surgiu e evoluiu o Universo. Em 1833, Fritz Zwicky deduziu a existência da matéria escura no aglomerado de galáxias de Coma Berenice. No final dos anos 1970, foi descoberta grande quantidade de matéria escura nos halos de galáxias espirais. Essas descobertas mostram que a matéria “convencional” é uma pequena fração de toda a matéria do Universo. Em 1986 foi feito o primeiro mapa tridimensional de uma grande fatia do Universo, mostrando que em grande escala as galáxias se organizam em filamentos com pelo menos dezenas de milhões de parsecs.

Distribuição de galáxias: Grupo Local

A maioria das galáxias no Universo está em grupos. A Via Láctea se encontra em um modesto grupo que conta com cerca de 40 galáxias conhecidas em uma região com 8 milhões de anos-luz de diâmetro. As maiores galáxias do Grupo Local são duas espirais gigantes, a Via Láctea e a galáxia de Andrômeda, também conhecida como M31. Em terceiro lugar vem a galáxia espiral M33. Praticamente toda a massa do Grupo Local, estimada em cerca de 2×10^{12} massas solares, está concentrada nestas duas grandes espirais. O Grupo Local se divide em dois pequenos subgrupos: o da Via Láctea e o de M31. A maioria das galáxias está ligada a uma ou outra espiral gigante.

Grupos Compactos

Alguns grupos são extremamente compactos, onde as galáxias quase se acotovelam. Esses grupos compactos são relativamente raros, mas muito interessantes pois fenômenos ligados a interações fortes entre as galáxias podem ser observados.

Aglomerados de Galáxias

Aglomerados de galáxias são as maiores estruturas em equilíbrio no Universo. Dentro de um volume com diâmetro de 20 milhões de anos-luz podemos encontrar milhares de galáxias. A massa total de um aglomerado varia entre 10^{14} e 10^{15} massas solares. Esses objetos são raros, apenas cerca de 7% das galáxias pertencem a aglomerados. Dois aglomerados de galáxias foram percebidos ainda no século 18: o aglomerado de Virgem (o mais próximo) e o Aglomerado de Coma (o mais rico no universo local). Entre 1958 e 1989, George Abell (1927-1983) e colaboradores catalogaram mais de 4 mil aglomerados ricos de galáxias, muito utilizado até hoje.

Aglomerados de galáxias têm três componentes básicas: as próprias galáxias, o gás difuso intra-aglomerado e matéria escura. A maioria das galáxias em aglomerados são elípticas e lenticulares. A soma da massa de todas as galáxias não passa de 2 ou 3% da massa total do aglomerado. Uma grande quantidade de gás, que emite raios X, permeia as galáxias. Todo este gás é responsável por 12 a 15% da massa total dos aglomerados. A temperatura do gás intra-aglomerado é superior à do núcleo do Sol, variando tipicamente entre 20 a 120 milhões de graus. A componente invisível, ou a “massa faltante” como já foi chamada no passado, foi detectada por Zwicky nos anos 1930. A matéria escura é responsável por cerca de 85% da massa do aglomerado.

Superaglomerados

O Grupo Local é parte do Superaglomerado Local, dominado pelo aglomerado de Virgem e composto por dezenas de pequenos grupos. Os superaglomerados são objetos em formação, fora de equilíbrio. Tipicamente os superaglomerados têm dimensão de 100 milhões de anos-luz e massas entre 10^{16} e 10^{17} massas solares. Alguns dos superaglomerados mais próximos são o de Perseus-Peixes, Shapley e Hidra-Centauro.

Estrutura em grande escala

Quando observamos o universo local notamos que as galáxias tendem a se agrupar. Em escalas menores estão os grupos e aglomerados de galáxias e, em escalas maiores, os superaglomerados e os filamentos cósmicos, também chamados de “muros”. Os maiores muros conhecidos têm até 700 milhões de anos-luz de extensão. A estrutura do Universo é semelhante a um emaranhado de teias. Entre os grandes filamentos cósmicos traçados pelas galáxias existem regiões enormes, os “vazios cósmicos”, com centenas de milhões de anos-luz. A distribuição de matéria no Universo se compara bem com a distribuição prevista a partir de modelos calculados com simulações numéricas. Nessas simulações o Universo é representado por bilhões de pontos. Esses cálculos levam meses para serem elaborados nos mais potentes computadores e o resultado é semelhante às observações.

9.5 GALÁXIAS PECULIARES: COLISÕES GALÁCTICAS

A maioria das galáxias brilhantes apresenta morfologia relativamente regular e apenas uma pequena fração exibe formas peculiares, não se encaixando na classificação morfológica de Hubble. Nos anos 1970 ficou claro que as galáxias não vivem separadas uma das outras. As colisões ou passagens próximas de uma galáxia por outra não é raro. A passagem de uma galáxia próxima de outra, sem haver colisão propriamente dita, resulta na deformação de ambas. Com o tempo ficou claro que esses encontros entre galáxias têm um papel importante na moldagem da forma desses objetos. Foi constatado que as colisões de galáxias ricas em gás produzem um surto de formação estelar. A Via Láctea também sofre colisões. A galáxia elíptica anã da constelação do Sagitário estaria sendo “canibalizada” pela Via Láctea. Este é um processo que leva centenas de milhões de anos e resulta de várias colisões sucessivas. As Nuvens de Magalhães também serão “canibalizadas” em alguns bilhões de anos. A colisão mais espetacular da Via Láctea deve ocorrer em 3 ou 4 bilhões de anos em um encontro quase frontal com a galáxia de Andrômeda, formando uma galáxia elíptica gigante.

Galáxias ativas, radiogaláxias e quasares

Desde o início do século 20 notou-se que o espectro de certas galáxias é peculiar, apresentando linhas de emissão intensas e largas. A aparência dessas galáxias parece normal, exceto por um núcleo um pouco mais brilhante que a média. Em 1943, Carl K. Seyfert voltou a se interessar por galáxias com linhas de emissão fortes e largas. As galáxias Seyfert são identificadas e classificadas pelo seu espectro óptico: quando as linhas do espectro de hidrogênio são muito largas são chamadas de Tipo 1; quando essas linhas são mais estreitas são de Tipo 2.

Em 1962 foi descoberto o primeiro quasar (do inglês *quasi-stellar radio source*, ou fonte rádio quase-estelar), um objeto distante, compacto e extremamente energético. Os quasares

chamaram muito a atenção por duas razões. A primeira é pela aparência estelar: um simples ponto no céu. A segunda, por serem objetos muito luminosos. Um quasar emite tanta energia quanto uma galáxia como a nossa e brilham ainda mais em comprimentos de onda como infravermelho e ultravioleta. O telescópio espacial Hubble obteve imagens de quasares e se constatou que esses objetos vivem no núcleo de galáxias. Os quasares são semelhante às galáxias Seyfert, mas muito mais luminosos.

Depois dos anos 1930, sobretudo após a Segunda Guerra Mundial, a radioastronomia floresceu e permitiu a descoberta de uma nova classe de objetos: as radiogaláxias. Elas apresentam diversas morfologias, mas têm algo em comum: a fonte de energia da emissão rádio está no núcleo da galáxia hospedeira.

A região que produz a energia de um quasar não pode ser resolvida, mas logo percebeu-se que a intensidade do brilho dessas fontes varia com o tempo. O período de variação de uma fonte está relacionado a seu tamanho: quanto maior a fonte, maior o tempo necessário para ocorrer uma variação na sua luminosidade. Uma variação de algumas horas significa que a fonte deve ter um tamanho de algumas unidades astronômicas. Um quasar emite tanta energia quanto uma galáxia inteira, mas essa energia é produzida em um volume menor que o do Sistema Solar. O mecanismo capaz de liberar tamanha quantidade de energia é a queda de matéria em um buraco negro supermassivo. Um buraco negro de 100 milhões de massas solares alimentado por uma massa solar por ano produz 100 trilhões de vezes mais energia que o Sol e isso por centenas de milhões de anos. A conversão de energia potencial gravitacional em radiação é mais eficiente que a produção de energia por fusão nuclear.

O modelo unificado de núcleos ativos de galáxias explica os vários tipos de quasares e galáxias Seyfert observados. Quando observamos o “motor” do núcleo ativo na direção da vertical do toro molecular, temos uma visão desobstruída do disco de acreção. Neste caso, o objeto parecerá um Blasar (tipo de quasar com variabilidade de luminosidade muito intensa e rápida). Com um pouco mais de inclinação, o próprio disco de acreção obstrui um pouco a região mais próxima do buraco negro; nesta situação, o objeto nos parecerá como um quasar ou, se for menos intenso, como uma galáxia Seyfert de tipo 1. Aumentando mais ainda a inclinação de observação, o toro molecular passa a impedir uma visão clara do disco de acreção; agora o objeto parecerá uma Seyfert de tipo 2. Se houver emissão de partículas relativísticas do núcleo, elas irão interagir com o campo magnético e emitir ondas de rádio. Nesta condição, o objeto é visto como uma radiogaláxia.

Eventualmente, o combustível do núcleo ativo termina, o estoque de gás disponível se esgota. Foi descoberto nas últimas décadas que todas as galáxias brilhantes próximas da Via Láctea têm um buraco negro supermassivo central. Mas, na maioria dos casos, esse buraco negro está dormente, sem o combustível necessário para transformá-lo em um quasar.

9.6 Formação de galáxias

A formação de objetos no Universo decorre da instabilidade gravitacional. Regiões com massa acima de um valor crítico não se mantêm em equilíbrio e colapsam. Em 1962, Eggen, Lynden-Bell e Sandage propuseram um cenário de formação de galáxias chamado de “colapso monolítico”. Nesse cenário, as galáxias se formam pelo colapso gravitacional de uma grande massa de gás. Durante a queda da matéria, uma parte do gás forma estrelas e aglomerados globulares. Se a massa de gás tiver alguma rotação, ela aumenta à medida que a nuvem colapsa e forma um disco. Mas esse cenário não pode explicar algumas propriedades e observações de galáxias como, por exemplo, a quantidade de metais nos aglomerados

globulares. Atualmente o cenário mais aceito de formação de galáxias é o chamado modelo hierárquico: primeiro formam-se as menores galáxias que vão se fundindo para formar galáxias cada vez maiores. Para se entender as propriedades das galáxias, incluindo a Via Láctea, além do mecanismo de formação é preciso levar em conta a evolução desses objetos. Processos evolutivos lentos, chamados de “evolução secular” têm papel importante para dar a forma e aparência observada nas galáxias.

9.7 Lentes gravitacionais

Em 1704, Isaac Newton cogitou o possível efeito da gravitação sobre a luz. A influência da gravitação sobre a luz (na verdade qualquer radiação eletromagnética) só foi esclarecida em 1915, com a teoria da gravitação de Einstein (a “teoria da relatividade geral”). Matéria e energia deformam o espaço-tempo e isso determina a trajetória da matéria e radiação. Espaço-tempo é o sistema de coordenadas utilizado na relatividade de Einstein. O tempo e o espaço tridimensional são concebidos em conjunto, como uma única grandeza de quatro dimensões. Quanto maior a massa, maior a deformação do espaço-tempo nas vizinhanças dela. A luz que se propaga em um espaço curvo descreverá uma curva. Durante o eclipse solar de maio de 1919, observado na cidade de Sobral, no Ceará, por astrônomos ingleses, constatou-se a alteração da trajetória da luz das estrelas pelo campo gravitacional do Sol. Isto também ocorre quando a luz de um objeto distante passa pelas proximidades de uma galáxia ou um aglomerado de galáxias. Se houver alinhamento entre a fonte distante, a galáxia que atua como “uma lente” e o observador na Terra, observamos a imagem da fonte como um anel de Einstein.

No caso de não haver alinhamento, ou se a “lente” for assimétrica, observamos imagens múltiplas do objeto distante. Casos ainda mais espetaculares ocorrem quando a lente gravitacional é formada por um aglomerado de galáxias. Neste caso observamos arcos gravitacionais. A observação desses arcos e imagens múltiplas permite determinar a massa total das lentes gravitacionais.

TESTES

1. Assinale a alternativa correta quanto à classificação morfológica de Hubble.
 - a) Galáxias espirais são mais azuis do que galáxias elípticas.
 - b) A taxa de formação estelar é em geral maior em galáxias menor razão bojo/disco.
 - c) Galáxias elípticas têm grande quantidade de poeira e gás.
 - d) A classificação morfológica de Hubble reflete uma sequência evolutiva.

2. Qual é a evidência da existência de matéria escura na Via Láctea e nas galáxias espirais em geral?
 - a) O brilho mais forte do bojo galáctico.
 - b) A curva de rotação do disco galáctico.
 - c) A distribuição de aglomerados globulares.
 - d) A medida da espessura dos discos galácticos.

3. O que é o Grupo Local de galáxias?
 - a) Um grupo de uma dezena de galáxias ao redor da Via Láctea.
 - b) Um aglomerado de galáxias com centenas de galáxias como a Via Láctea.

- c) O par de galáxias Via Láctea e M31.
- d) Um grupo com três galáxias espirais, das quais uma é a Via Láctea.

4. Assinale a alternativa falsa: Em aglomerados de galáxias...

- a) A maior parte da matéria bariônica está na forma de um gás difuso entre as galáxias.
- b) A maior parte da massa está contida nas galáxias brilhantes.
- c) Historicamente, a primeira evidência de matéria escura veio do estudo de aglomerados de galáxias.
- d) Podemos encontrar até milhares de galáxias em um volume de cerca de 20 milhões de anos-luz de diâmetro.

5. Em grande escala, como a matéria se distribui no universo?

- a) Em camadas bi-dimensionais chamadas “panquecas”.
- b) Em filamentos chamados “teia cósmica”.
- c) Em uma distribuição fractal, não homogênea.
- d) Em uma distribuição perfeitamente homogênea, sem sobre-densidades.

6. Em 1920 ocorreu o “Grande Debate” onde duas concepções diferentes do universo foram confrontadas. Assinale a(s) alternativa(s) correta(s):

- a) As questões levantadas neste “Debate” foram resolvidas com as determinações de distância de galáxias próximas por E. Hubble.
- b) O “Debate” foi apenas uma formalidade, pois o uso da paralaxe espectroscópica permitia a determinação de galáxias próximas.
- c) Os pontos defendidos por Shapley no “Debate” era do Sol distante do centro da Via Láctea e das nebulosas espirais fazendo parte da Galáxia.
- d) Um dos argumentos contra a hipótese de “universos-ilha” era a grande velocidade radial medida para as nebulosas espirais.
- e) A questão de nebulosas como “universos-ilha” ainda não tem solução conhecida.

7. Assinale a(s) alternativa(s) correta(s) que completam a frase: Ao longo da sequência de Hubble, de *early-type* (tipo precoce) até *late-type* (tipo tardio)...

- a) Aumenta a taxa de formação estelar.
- b) Aumenta a importância do bojo em relação ao disco.
- c) Aumenta a massa.
- d) Aumenta a quantidade de gás.
- e) Aumenta a distância da Via Láctea.

8. Assinale a(s) alternativa(s) correta(s) que completam a frase Galáxias elípticas...

- a) Nunca apresentam emissão em raios X.
- b) São galáxias vermelhas.
- c) Têm alta taxa de formação estelar.
- d) São compostas por estrelas com órbitas circulares.
- e) São menos frequentes fora de grupos, mas muito comum em aglomerados de galáxias.

9. Qual é a fonte de energia de um Quasar?

- a) Fusão nuclear de hidrogênio em hélio.
- b) Fissão nuclear de urânio e plutônio.

- c) Aniquilação de antimatéria.
- d) Que de matéria por um disco de acréscimo em um buraco negro.
- e) Jatos de elétrons relativísticos lançados pelos polos.

10. Qual é a característica espectral, no óptico, que distingue uma galáxia de núcleo ativo de uma galáxia normal?

- a) Linhas de absorção largas produzidas por metais.
- b) Ausência de linhas espectrais.
- c) Linhas de emissão intensas e largas.
- d) Linhas que surgem e desaparecem periodicamente.

11. Assinale a(s) alternativa(s) correta(s):

- a) O Grupo Local é dominado (em massa) por 3 galáxias: a Via Láctea, a grande Nuvem de Magalhães e M31 (galáxia de Andrômeda).
- b) Existem 3 galáxias espirais no Grupo Local: a Via Láctea, M31, e M33 (galáxia da constelação do Triângulo).
- c) As galáxias anãs do Grupo Local estão principalmente distribuídas espacialmente em duas concentrações: uma em volta de M31 e outra em volta da Via Láctea.
- d) No Grupo Local existe uma galáxia elíptica gigante, M32, que perturba o movimento da Galáxia.
- e) A eventual fusão da Via Láctea e M31 deverá produzir uma galáxia elíptica gigante.

12. Assinale a(s) alternativa(s) correta(s):

- a) Super aglomerados são as maiores estruturas em equilíbrio no universo.
- b) Super aglomerados são estruturas com cerca de $30 \sim \text{Mpc}$ compostos por vários aglomerados e grupos de galáxias.
- c) As galáxias se distribuem de maneira uniforme em qualquer escala.
- d) Aglomerados de galáxias se encontram em filamentos com extensão de até centenas de Mpc .
- e) Existem regiões com várias dezenas de Mpc sem galáxias brilhantes, os chamados vazios.

13. Assinale a(s) alternativa(s) correta(s):

- a) Colisões de galáxias espirais produzem uma diminuição da taxa de formação estelar.
- b) Colisões de galáxias de mesma massa produzem galáxias espirais.
- c) Colisões em alta velocidade (mais do que 3.000 km/s) resultam na fusão de galáxias.
- d) A galáxia anã de Sagitário está colidindo com a Via Láctea.
- e) Colisões de galáxias podem produzir caudas de maré.

RESPOSTAS

1 (a); 2 (b); 3 (d); 4 (b); 5 (b); 6 (a), (c) e (d); 7 (a) e (d); 8 (b) e (e); 9 (d); 10 (c); 11 (b), (c) e (e); 12 (b), (d) e (e); 13 (d) e (e).

CAPÍTULO 10 - COSMOLOGIA

Gastão Bierrenbach Lima Neto

OBJETIVOS

Dar ao aluno uma visão global do Universo, sua história e sua composição. Introdução à Teoria do Big Bang, seu embasamento observacional e teórico.

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

10.1 INTRODUÇÃO

Cosmologia é o estudo da história, estrutura e composição do Universo. Não podemos observar nosso próprio passado, mas ao apontar os telescópios para as galáxias mais distantes podemos observar cenas remotas no tempo e no espaço. O método científico serve de guia para juntarmos as observações para compreender o Universo.

10.2 BREVE HISTÓRICO DE MODELOS COSMOLÓGICOS

As questões cosmológicas são muito antigas. No passado a percepção do Universo se misturava a mitos e superstições. Baseando-se em observações sistemáticas feitas durante séculos na Mesopotâmia e Egito, filósofos gregos explicaram a distribuição e movimento dos astros utilizando modelos matemáticos e geométricos. No século 3 a.C., Aristarco de Samos, sugeriu que o Sol está no centro do Universo, mas o paradigma por mais de 1.500 anos foi o modelo Aristotélico geocêntrico, aperfeiçoado nos séculos seguintes por Hiparco e Ptolomeu com o uso epiciclos.

O estudo da estrutura do Universo avança com Copérnico, Brahe e Kepler nos séculos 15 e 16. A utilização do telescópio, introduzido por Galileu Galilei no início do século 17, revoluciona a astronomia. Galileu mostra que o universo geocêntrico não é compatível com as novas observações. Wright, Kant e Lambert, em meados do século 18, propõem independentemente um modelo de “universos-ilhas”, onde a Via Láctea seria uma destas “ilhas” assim como as chamadas nebulosas.

O século 20 inicia com duas visões conflitantes quanto à estrutura do Universo: a Via Láctea é pequena, com o Sol no centro e as nebulosas distantes; a visão concorrente é a de uma Via Láctea grande, com o Sol na periferia, e as nebulosas no seu interior. Nenhum dos dois modelos era correto. Com os trabalhos de Slipher, Humason e, sobretudo, Hubble, ficou claro que as nebulosas espirais eram galáxias como a nossa e que o Sol está num subúrbio da Via Láctea.

Aprendemos que o Universo pode ser caótico, onde a complexidade das interações torna virtualmente alguns fenômenos imprevisíveis, mas não é arbitrário e obedece às leis da física.

10.3 PARADOXO DE OLBERS

Uma questão aparentemente trivial, mas importante para a cosmologia é: “Por que a noite é escura?” Em 1720 Halley raciocinou da seguinte forma: o brilho de uma estrela diminui proporcionalmente ao quadrado da distância, mas se imaginarmos as estrelas distribuídas em cascas esféricas, o número de estrelas em cada casca aumenta com o quadrado da distância. O aumento do número de estrelas compensa a diminuição do brilho e, se o Universo for infinito, o resultado final é que o brilho do céu deve ser infinito também. Olbers popularizou este paradoxo em 1823 e a solução só seria descoberta no início da década de 1930.

10.4 A EXPANSÃO DO UNIVERSO

Em 1908, Henrietta Leavitt descobriu a correlação entre o período de pulsação e a luminosidade das estrelas variáveis chamadas Cefeidas. Alguns anos mais tarde, Vesto Slipher obteve o espectro de diversas nebulosas e descobriu que alguns desses objetos estão se movendo à velocidade de várias centenas de km/s, na maioria dos casos se afastando de nós.

Em 1915, Albert Einstein publicou a teoria da relatividade geral que é aplicada no estudo da evolução do Universo por Friedman, mostrando que o tamanho do Universo pode mudar com o tempo. Independentemente, Lemaître descobriu a mesma solução de Friedman de um universo dinâmico. Hubble no Observatório de Monte Wilson conseguiu, em 1923, observar estrelas Cefeidas em algumas nebulosas e, usando a relação descoberta por Leavitt, mediu pela primeira vez de forma precisa a distância desses objetos, mostrando que essas nebulosas eram, de fato, outras galáxias. Em 1929, Hubble verificou uma correlação: quanto mais distante a galáxia maior a velocidade com que ela se afasta de nós. Essa relação ficou conhecida como Lei de Hubble e expressa pela relação: $V = H_0 \times D$, onde H_0 é a constante de Hubble.

10.5 A TEORIA DO BIG BANG

A lei de Hubble é interpretada como uma observação da expansão do Universo, como previa as soluções de Friedman e Lemaître. Se o Universo aumenta de tamanho com o tempo, isso significa que, se extrapolarmos esse raciocínio para o passado, concluímos que em algum momento o tamanho do Universo foi nulo. A idade do universo pode ser estimada em primeira aproximação usando a relação: tempo = distância/velocidade = distância/($H_0 \times$ distância) = $1/H_0$. O valor da constante de Hubble é de cerca de 72 km/s/Mpc. Isto significa que a idade do universo é de cerca de 14 bilhões de anos. Esta é a base do modelo do Big Bang, a grande expansão. O Universo não tem centro e não existe um ponto hoje em algum lugar de onde se originou a expansão. A “grande expansão” é um conceito muito diferente de uma explosão. A expansão do Universo se refere a tudo, inclusive o espaço e o tempo.

10.6 SOLUÇÃO DO PARADOXO DE OLBERS E O TAMANHO DO UNIVERSO

A solução do paradoxo de Olbers está na teoria do Big Bang. O céu noturno não é brilhante porque vivemos em um universo relativamente jovem. Isso significa que somente podemos observar a luz que teve tempo para chegar até nós. Pode ser que o Universo seja infinito. Neste

caso, é mais conveniente nos referirmos ao tamanho do universo observável. Como o Universo está em expansão e as fontes de luz distantes estão se afastando uma das outras o universo observável tem hoje um diâmetro de cerca de 92 bilhões de anos-luz.

10.7 BASE TEÓRICA DA COSMOLOGIA E O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO

A cosmologia é baseada na teoria de gravitação de Einstein. A quantidade de matéria e energia determina a geometria do Universo. O parâmetro que as distingue é a densidade de matéria e energia. Se a densidade for igual à densidade crítica, então o Universo tem geometria plana. Mas se for menor, então o Universo tem geometria aberta, como a curvatura de uma sela de cavalo. Nestes dois casos, o universo é infinito. Se a densidade for maior que a densidade crítica o Universo é finito com geometria fechada, semelhante a uma esfera. A densidade crítica do valor medido para a constante de Hubble é estimada em 10^{-29} gramas/cm³, algo como um átomo de hidrogênio para 170 litros.

As teorias cosmológicas atuais se baseiam no Princípio Cosmológico, em que o universo deve ser homogêneo e isotrópico em grandes escalas. Apenas em escalas superiores a cerca de 300 milhões de anos-luz constatamos a homogeneidade e isotropia cósmica. O Princípio Cosmológico implica ainda que o Universo tenha a mesma aparência para qualquer observador em qualquer parte. Outra consequência do Princípio Cosmológico, é que o Universo não pode ter uma borda ou um limite.

10.8 HISTÓRIA DO UNIVERSO

O momento do Big Bang ainda é uma singularidade que não pode ser descrito pelas leis da física que conhecemos. Assim, só podemos começar a descrever a história cósmica após um intervalo de tempo chamado tempo de Planck, por volta de 10^{-43} segundos. Nessa época de Planck, o Universo estava incrivelmente quente e denso. O próprio espaço-tempo era extremamente deformado por perturbações aleatórias. Esse primeiro período da história cósmica também é chamado de Época da Grande Unificação, pois três das quatro forças da Natureza (força eletromagnética, força fraca e força forte) se comportavam da mesma forma.

Quando o Universo tinha idade de 10^{-33} segundos, ocorreu um fenômeno chamado de inflação, quando o Universo expande exponencialmente. Um resultado importante da inflação é tornar o universo plano, como é medido pela análise das flutuações de temperatura da radiação cósmica de fundo.

Aniquilação da antimatéria

Após a fase de inflação, o Universo expande em um ritmo mais lento. Quando a idade cósmica atingiu um bilionésimo de segundo aconteceu outro evento, a matéria e antimatéria começaram a se aniquilar, convertendo a massa das partículas em energia. Para cada 1 bilhão de partículas de antimatéria existe em média 1 bilhão e uma partícula de matéria. O resultado dessa assimetria é que a antimatéria é virtualmente erradicada sobrando apenas a matéria.

Bariogênese

Quando o Universo atingiu 0,00001 segundo de existência sua temperatura decaiu para 1

trilhão K. Abaixo desta temperatura, os Quarks então livres se juntam para formar os prótons e nêutrons (chamados de bárions, partículas de 3 quarks).

Nucleossíntese primordial

Nucleossíntese significa produção de núcleos atômicos a partir da fusão termonuclear de núcleos mais leves. Quando o Universo atingiu a idade de um segundo, os prótons e nêutrons se envolveram em reações de fusão nuclear, formando principalmente o deutério. Passado o primeiro segundo, a temperatura e a densidade diminuíram a ponto do deutério sobreviver o suficiente para continuar a cadeia de reações nucleares. Assim, foi possível formar o elemento hélio. Esse processo de nucleossíntese primordial prosseguiu durante alguns poucos minutos formando ainda outros elementos, o lítio, berílio e boro. A nucleossíntese termina cinco minutos após o Big Bang. A física nuclear é relativamente bem conhecida e podemos prever a abundância de elementos formados nesta época. A quantidade de deutério, hélio e lítio podem ser determinadas a partir de observações. Todas as medidas apontam para a mesma quantidade de bárions no Universo. O valor mais aceito é que 4% do Universo é composto de bárions, com cerca de 24% da massa na forma de hélio.

Fim da era da radiação

Enquanto o Universo expande, a densidade de matéria diminui proporcionalmente ao aumento do volume. A radiação tem comportamento diferente, além da diminuição da densidade de energia da radiação ser inversamente proporcional ao volume, ainda há o efeito do aumento do comprimento de onda da radiação. Dessa forma, a densidade de energia da radiação diminui mais rapidamente que a densidade de matéria. Chega então um momento em que essas duas densidades, da matéria e radiação, se equipararam, marcando o fim da era da radiação e o início da era da matéria. Isso ocorreu quando o Universo tinha 60 mil anos. Esse é um momento importante, pois enquanto a radiação dominava não havia formação de estrutura.

Recombinação e radiação cósmica de fundo

Quando a idade cósmica chegou a 400 mil anos e sua temperatura atingia 3.000 K, não havia mais fótons energéticos o suficiente para manter a matéria ionizada. Os núcleos começaram a capturar os elétrons. Os átomos se tornaram neutros e o universo ficou transparente para a radiação. Chamamos este momento de Recombinação. Os fótons que interagiram com os elétrons pela última vez durante a recombinação são observados na Terra em todas as direções. Como esses fótons têm hoje uma frequência de radiação de micro-ondas, nós os chamamos de Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (RCFM). A RCFM foi prevista no final dos anos 1940 e observada em 1964 por Penzias e Wilson (que receberam o prêmio Nobel). Sua temperatura muito bem determinada de 2,725°K coincide com o valor esperado pela teoria do Big Bang, e é uma impressão digital do Universo há 14 bilhões de anos. As observações mostram pequenas flutuações na RCFM que correspondem a flutuações de densidade. A RCFM é uma das melhores evidências a favor da teoria do Big Bang.

Idade das trevas

Após a recombinação, não havia qualquer fonte de luz: é a Idade das Trevas. Durante 450 milhões de anos, a matéria foi se organizando e regiões com maior densidade passaram a colap-

sar. Nessa época se formou a teia cósmica traçada pela matéria. Os halos de matéria, regiões aproximadamente esféricas e em equilíbrio, que se formaram nesse período são as sementes das futuras galáxias e grupos de galáxias. A Idade das Trevas termina quando as primeiras estrelas e núcleos galáctico se formam.

Formação das primeiras estrelas e quasares

A formação de estruturas no Universo depende principalmente da matéria escura. Não sabemos exatamente o que se formou primeiro, mas os primeiros objetos colapsados eram muito energéticos. Um dos primeiros objetos a se formar foram as estrelas. Mas, diferentemente das atuais, essas pioneiras não tinham metais em sua composição química. Por serem de grande massa as primeiras estrelas, chamadas de População III, eram muito luminosas na faixa do ultravioleta. Estrelas de População III de baixa massa provavelmente não se formaram, por isso não encontramos nenhuma delas até agora. Na mesma época, buracos negros supermassivos, com milhões de vezes a massa do Sol, começaram a ser alimentados pelo gás concentrado na região que será posteriormente o núcleo das galáxias. Esse é o processo que gera energia em quasares. A emissão de radiação ultravioleta desses novos quasares e das primeiras estrelas ioniza o Universo novamente.

A era da energia escura

A densidade de matéria decaiu com o inverso do fator de escala do Universo elevado ao cubo, enquanto a densidade de energia da radiação reduziu-se proporcionalmente ao inverso da escala à quarta potência. Ao entrar na era da matéria, a densidade de radiação cósmica se tornou desprezível frente à densidade de matéria existente à época. Quando o Universo chegou à idade de 10 bilhões de anos, outra componente passou a dominar o balanço energético do universo: a energia escura. Ainda não sabemos o que é a energia escura, mas temos evidências de sua presença devido a um conjunto de observações. A energia escura tem uma propriedade muito peculiar: sua pressão é negativa. Nos últimos 4 bilhões de anos, o Universo está em fase de expansão acelerada devido à energia escura.

Futuro do universo

A evolução futura do Universo pode ser determinada conhecendo sua composição, mas também precisamos saber como a energia escura, a principal componente no universo atual, realmente se comporta. Podemos fazer previsões baseadas em possíveis propriedades. Se a energia escura for uma constante da Natureza, no caso a Constante Cosmológica introduzida por Einstein, então o Universo irá se expandir para sempre. Como a expansão é acelerada, tudo o que não estiver fortemente ligado pela gravidade na nossa região no Universo será arrastado para longe. Se a densidade da energia escura diminuir e a densidade de matéria for um pouco superior a 10^{-29} g/cm³, então a expansão cessará e a gravidade fará com que o Universo se contraia indefinidamente (o Big Crunch). Um outro cenário seria o caso da energia escura ter uma pressão maior do que a Constante Cosmológica; em alguns bilhões de anos teríamos uma expansão superexponencial. O espaço expandiria tão rapidamente que as galáxias perderiam suas estrelas, depois as estrelas perderiam seus planetas e, eventualmente, os átomos seriam arrancados das moléculas até, por fim, os quarks se separariam. Esse cenário seria o Big Rip.

10.9 COMPOSIÇÃO DO UNIVERSO: O LADO ESCURO DO UNIVERSO

A composição do Universo em elementos básicos sempre foi um assunto debatido em diversas culturas. Em 1933 foi observado que existe uma grande quantidade de massa nos aglomerados de galáxias que não podemos detectar diretamente, mas se que revela pela análise do movimento das galáxias. No final da década de 1970, foi descoberta uma grande quantidade de matéria distribuída ao redor das galáxias espirais, formando um halo de matéria escura. Em 1998, nossa visão de Universo foi revolucionada. As observações de supernovas distantes mostraram que esses objetos parecem menos brilhantes que o esperado, caso o Universo tivesse apenas matéria. Várias hipóteses foram descartadas e o melhor cenário para explicar o baixo brilho aparente das supernovas é a expansão acelerada do Universo, provocada pela energia escura. Esta conclusão foi confirmada pelas observações da RCFM no início do século 21. Medidas independentes da densidade de matéria resultam em um valor de cerca de 30% da densidade crítica. Se o universo é plano, então 70% de seu conteúdo está na forma de energia escura.

Antes do Big Bang?

Na teoria padrão do Big Bang, baseada na física que conhecemos e nos chamados três pilares observacionais (o afastamento das galáxias, a abundância dos elementos leves e a RCFM), não tem sentido falar de um momento anterior ao Big Bang. Devemos ir além da física relativística e quântica se quisermos que a questão sobre o que ocorreu antes do Big Bang tenha algum sentido. Na década de 1990 amadureceram novas ideias sobre a natureza cósmica e uma que tem mobilizado um grande número de pesquisadores é a Teoria das Cordas. Por essa teoria o Universo tem três dimensões espaciais grandes e outras sete espaciais pequenas, e as partículas fundamentais são cordas unidimensionais que vibram. Em alguns modelos cosmológicos baseado na Teoria das Cordas, o Big Bang seria apenas uma transição de duas fases do Universo.

TESTES

1. Com relação à origem do Universo, qual é a alternativa falsa:
 - a) O período da inflação primordial explica a uniformidade do Universo.
 - b) A idade das trevas se encerra com a formação das primeiras estrelas e quasares.
 - c) Como o Universo se originou de uma grande explosão, ele possui um centro.
 - d) A taxa de expansão do Universo está acelerando.
2. Assinale a alternativa correta:
 - a) A nucleossíntese estelar explica as abundâncias de deutério e de hélio no Universo.
 - b) A maior parte do hélio observada foi formada cinco minutos após o Big Bang.
 - c) Logo após o Big Bang foram formados todos os elementos da tabela periódica.
 - d) A abundância de deutério é um dos problemas não resolvidos da teoria do Big Bang.
3. Assinale a alternativa correta:
 - a) Quando observamos a radiação cósmica de fundo, percebemos a existência de pequenas diferenças de temperatura por todo o céu.

- b) A observação da radiação cósmica de fundo nos dá informações sobre o estado do universo há cerca de 13 bilhões de anos atrás.
- c) A radiação cósmica de fundo tem exatamente a mesma temperatura em toda a esfera celeste.
- d) A variação de temperatura observada na radiação cósmica de fundo é incompatível com a teoria do Big Bang.

4. Qual opção está na ordem cronológica correta:

- a) Formação do Sol; Nucleossíntese primordial; Recombinação; Inflação.
- b) Inflação; Nucleossíntese primordial, Recombinação, Formação das estrelas.
- c) Nucleossíntese primordial; Formação das galáxias; Recombinação; Idade das Trevas.
- d) Idade das Trevas; Inflação; Recombinação; Nucleossíntese primordial.

5. Até o final do século 19, a ideia predominante era a de que o Sol estaria no centro da Via Láctea. Por que? Assinale a(s) alternativa(s) correta(s):

- a) O Sol, de fato, está praticamente no centro da Via Láctea.
- b) Como o Sol se encontra no bojo da Via Láctea, temos a impressão de estar no centro.
- c) A poeira absorve a luz das estrelas mais distantes e temos a impressão de estar no centro da Via Láctea.
- d) Os aglomerados globulares da Galáxia se distribuem ao redor do Sol.
- e) O número de estrelas observáveis é aproximadamente o mesmo quando comparamos direções opostas na esfera celeste.

6. Assinale a(s) opção(ões) correta(s):

- a) Hoje, observamos que o Universo está se contraindo.
- b) Segundo observações recentes, no futuro o universo deve cessar sua expansão acelerada.
- c) Durante a época da nucleossíntese primordial, o Universo era dominado pela radiação.
- d) O valor da constante de Hubble mede a taxa de expansão do Universo hoje.
- e) Os fótons da radiação cósmica de fundo que observamos hoje viajaram por mais de 13 bilhões de anos.

7. Assinale a alternativa falsa:

- a) O Grande Debate de 1920 opunha a ideia de um universo de muitas galáxias à ideia de apenas uma galáxia, a Via Láctea.
- b) H. Shapley mostrou que o Sol não está no centro da Galáxia através da observação da distribuição espacial de aglomerados globulares.
- c) A existência de poeira interestelar dificulta a determinação da distância das estrelas e, consequentemente, da forma da Via Láctea.
- d) A teoria do Big Bang foi o principal resultado do Grande Debate de 1920.

8. Assinale a alternativa correta:

- a) A expansão do Universo é um fenômeno local, observado pelo movimento de galáxias próximas.
- b) A expansão do Universo foi descoberta pela observação de que, quanto mais distantes, mais rapidamente se afastam as galáxias.
- c) Hoje em dia, podemos medir a expansão do Universo em laboratórios como o CERN.
- d) A teoria do Big Bang surgiu como uma consequência da observação da expansão do Universo.

9. Assinale a alternativa falsa:

- (a) Observações recentes mostram que a geometria do Universo deve ser plana ou muito próxima disto.
- (b) O princípio cosmológico diz que o Universo deve ser isotrópico e homogêneo em grande escala.
- (c) A geometria do universo é determinada pela sua quantidade de matéria e energia.
- (d) A expansão acelerada do universo está alterando sua geometria.

RESPOSTAS

1(c); 2 (a); 3 (a); 4 (b); 5 (c) e (e); 6 (c), (d) e (e); 7 (d); 8 (d); 9 (d).

CAPÍTULO II - À PROCURA DE VIDA FORA DA TERRA

Augusto Daminski

OBJETIVOS

O objetivo deste capítulo é mostrar como a Astronomia pode dar uma contribuição importante sobre a vida no Universo, se ela é um fato corriqueiro ou se provavelmente estamos sós.

REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A detecção de sinais de vida fora da Terra está focada em sinais indiretos de atividade biológica (micro-organismos) tais como camadas atmosféricas de Ozônio e Metano. A procura se dará em exoplanetas rochosos. Esse objetivo está trazendo uma grande revolução nas técnicas astronômicas. Qualquer que seja o resultado, será a primeira vez que a humanidade poderá discutir a existência ou não de vida extraterrestre em base a dados observacionais.

TESTES

Múltipla escolha

1. A procura de vida fora da Terra se dará:
 - (a) Principalmente em exoplanetas.
 - (b) Principalmente em planetas do Sistema Solar.
 - (c) Em satélites dos planetas solares.
 - (d) Através de ondas de rádio.
 - (e) Nenhuma das anteriores.
2. Os sinais procurados são:
 - (a) Comunicações em ondas de rádio.
 - (b) Sinais de ozônio e/ou metano no infravermelho próximo.
 - (c) Presença de água nas atmosferas dos planetas.
 - (d) Observação de naves alienígenas visitando a Terra.
 - (e) Nenhuma das anteriores.
3. A existência de vida no Universo é:
 - (a) Certa, pois não teria sentido existir só na Terra.

- (b) Difícil, dada a dificuldade de encontrar água no Universo
- (c) Provável, dada a abundância das condições necessárias
- (d) Improvável, dada a existência de poucos planetas no Universo
- (e) Nenhuma das anteriores

4. As indicações de que nosso Universo é biófilo são:

- (a) A vida na Terra apareceu nos primórdios do planeta.
- (b) A água é uma substância muito abundante e antiga no Universo.
- (c) Os átomos biogênicos (CHONPS) são muito abundantes no Universo.
- (d) A vida na Terra sobreviveu a catástrofes globais ao longo da evolução do planeta.
- (e) Todas as afirmativas são corretas.

5. Os exoplanetas descobertos até agora:

- (a) São em número não muito maior que no sistema solar.
- (b) São principalmente rochosos e pequenos.
- (c) São principalmente gasosos e gigantes.
- (d) Atestam que o sistema solar é um caso especial no Universo.
- (e) Nenhuma das anteriores.

6. O tipo de vida a ser procurado será:

- (a) Vida inteligente (ETIs).
- (b) Vida igual a que sempre dominou nosso planeta (micróbios).
- (c) Plantas, pois elas são autótrofas (produzem seu próprio alimento).
- (d) Todos os tipos de vida, inclusive os que não existem na Terra.
- (e) Nenhuma das anteriores.

RESPOSTAS

1 (a); 2 (b); 3 (c); 4 (e); 5 (c); 6 (b).

ATIVIDADES PRÁTICAS

Desenhe uma linha do tempo cobrindo a evolução da Terra desde sua formação até hoje e marque sobre ela, respeitando as proporções do tempo, os seguintes fatos:

- Origem da Terra (4,56 bilhões de anos).
- Origem da vida (3,5 a 3,8 bilhões de anos).
- Origem da atmosfera oxigenada (2,5 bilhões de anos).
- Origem dos seres multicelulares (600 milhões de anos).
- Origem da humanidade (50-70 mil anos).
- Origem das telecomunicações (cerca de 100 anos).
- Hoje.

Calcule a porcentagem de tempo que transcorreu desde cada um desses eventos até hoje, em relação ao tempo de vida do planeta.

Discuta com seu grupo/classe por que seria muito mais provável encontrar vida microbiana do que vida multicelular ou “inteligente”, se ela existir em outros planetas?

Para demonstrar o quanto a comunicação é ineficiente para troca de informações no Universo, use o fato de que as ondas de rádio viajam a velocidade da luz e calcule qual a distância máxima de nós (em anos-luz) que elas teriam atingido até agora?

Compare esse valor com o diâmetro da Via Láctea (100 mil anos-luz) e com a distância até o aglomerado de galáxias mais próximo de nós que fica a uns 400 milhões de anos-luz.

Discuta com seus colegas o que deveria ser feito se recebêssemos sinais de uma civilização de Andrômeda (2 milhões de anos-luz).



Grande Conjunto de Radiotelescópios Milimétrico/submilimétrico de Atacama, conhecido como ALMA (acrônimo de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), no planalto de Chajnantor, Deserto de Atacama, Chile, é um projeto em parceria entre Estados Unidos, ESO - Observatório Austral Europeu - e Japão."

O céu nos envolve. Olhamos para o alto em busca de estrelas e de planetas, mas também em busca de respostas. Alimentada por telescópios cada vez mais sensíveis, nossa curiosidade nos leva à descoberta de corpos astronômicos e a questionamentos sobre a natureza da matéria e da energia escuras.

Neste livro, astrônomos ajudam a aproximar o conhecimento atual de quem não está atrás do telescópio. Os capítulos conduzem o leitor a uma jornada pelo Universo – de sua origem à evolução das galáxias; de nosso Sistema Solar a sistemas planetários distantes; da influência do céu na vida dos homens à especulação sobre a vida fora de nosso planeta.

O céu que nos envolve é uma contribuição do Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP para a formação de uma cultura astronômica no Brasil. O projeto do livro inclui manual de apoio para educadores e materiais complementares na internet. Trata-se de levar a astronomia através não apenas de fronteiras espaciais, mas também de fronteiras sociais.