

# **CAPÍTULO 9**

## **FUNDAMENTOS DE ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA**

**André de Castro Milone<sup>1</sup>**

**João Braga<sup>2</sup>**

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**

---

<sup>1</sup> e.mail: milone@das.inpe.br

<sup>2</sup> e.mail: braga@das2.inpe.br



## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>9 - 5</b>
<b>1 BREVE HISTÓRICO DA ASTRONOMIA</b> .....	<b>9 - 7</b>
1.1 NASCIMENTO DA ASTRONOMIA .....	9 - 7
1.2 QUAL É A DIFERENÇA ENTRE ASTRONOMIA E ASTROLOGIA?	9 - 8
1.3 QUAL É A DIFERENÇA ENTRE ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA?	9 - 9
1.4 PERCEPÇÃO DO TEMPO NA ASTRONOMIA .....	9 - 10
1.5 METODOLOGIA CIENTÍFICA: COMO FAZER CIÊNCIA .....	9 - 11
1.6 INÍCIO DA ASTRONOMIA MODERNA .....	9 - 13
<b>2 NOÇÕES SOBRE ESPAÇO</b> .....	<b>9 - 15</b>
2.1 ESPAÇO GEOMÉTRICO .....	9 - 15
2.2 ESPAÇO SIDERAL .....	9 - 16
<b>3 ESFERA CELESTE</b> .....	<b>9 - 17</b>
3.1 MOVIMENTO DOS ASTROS NO CÉU .....	9 - 17
3.2 COORDENADAS CELESTES HORIZONTAIS LOCAIS .....	9 - 19
3.3 COORDENADAS CELESTES EQUATORIAIS .....	9 - 20
<b>4 NOÇÕES SOBRE ESTRELAS E OBJETOS EXÓTICOS EM ASTROFÍSICA</b> .....	<b>9 - 21</b>
<b>5 INSTRUMENTOS ASTRONÔMICOS</b> .....	<b>9 - 24</b>
<b>6 MEDIDAS EM BALÕES E SATÉLITES</b> .....	<b>9 - 25</b>

**7 BIBLIOGRAFIA ..... 9 - 27**

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - A ESFERA CELESTE: UMA VISÃO GEOCÊNTRICA DO UNIVERSO . . . . . 9 - 19**
- FIGURA 2 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DE UM LOCAL ENTRE O EQUADOR E O PÓLO SUL . . . . . 9 - 21**



# **1 BREVE HISTÓRICO DA ASTRONOMIA**

## **1.1 NASCIMENTO DA ASTRONOMIA**

A Astronomia é uma das ciências mais antigas ou provavelmente a mais antiga. Há registros de desenhos de astros inscritos em rochas (rupestres) da época pré-histórica (100 mil anos atrás até cerca de 8 mil a.C.), quando o homem ainda vivia em pequenos grupos nômades. Nessa época, a integração dos nossos antepassados com a natureza deveria ser muito maior do que nos tempos atuais. A preocupação com a sobrevivência era constante: saber buscar os alimentos através da caça, pesca e colheita de frutos e raízes, saber adaptar-se às variações do tempo meteorológico (clima e estações do ano), saber se proteger de animais perigosos e saber se adequar a mais evidente alternância de claro-escuro da natureza, o dia e a noite.

Certamente, o Sol foi o primeiro astro a ser notado. A Lua foi o segundo astro a ser percebido, visto que ilumina a escuridão da noite, principalmente em sua fase cheia. As estrelas devem ter sido notadas em seguida, como pontos brilhantes em contraste a um céu bastante escuro. Os outros cinco astros errantes visíveis a olho nu só foram notados quando a observação do céu se tornou persistente noite após noite. Esses cinco astros são os planetas Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. O significado original da palavra planeta, de origem grega, é astro que se move. Esse tipo de investigação da natureza já necessitava de um pouco mais de inteligência por parte de nossos ancestrais.

Após a última glaciação, a agricultura e a domesticação de animais tornaram-se atividades importantes para a sobrevivência do homem em nosso planeta. Começaram a aparecer os primeiros vilarejos e povoados. As primeiras civilizações mais notáveis surgiram a partir de 5500 anos atrás, em quatro regiões hidrográficas distintas do planeta: (i) nas bacias dos rios Tigre e Eufrates (Mesopotâmia, região atual do Irã e Iraque), por volta do ano 3500 a.C., com os sumerianos; (ii) ao longo do rio Nilo (atual Egito) em torno de 3100 a.C.; (iii) nas margens do rio Indus (atual Índia) por volta de 2500 a.C. e (iv) em torno do rio Amarelo (atual China) em cerca do ano 2000 a.C. As

sociedades Indu, da Mesopotâmia e do Antigo Egito influenciaram umas às outras devido à proximidade entre elas, inclusive marcando o desenvolvimento de outras posteriores como a da Antiga Grécia.

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

## 1.2 QUAL É A DIFERENÇA ENTRE ASTRONOMIA E ASTROLOGIA?

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

Atualmente, a Astronomia está muito diferenciada da Astrologia porque esta última interpreta os fenômenos celestes através de uma linguagem de crenças, símbolos e mitologias e não por meio da metodologia científica seja ela experimental e/ou teórica.

Inclusive, a Astronomia sofreu e ainda sofre mudanças, até mesmo radicais, nos modelos concebidos para descrever e explicar um fenômeno celeste ou o próprio universo. A Astrologia afirma que os astros regem a vida e a personalidade dos humanos mas não admite testar cientificamente essa afirmação. A Astronomia, ao contrário, elabora modelos testáveis que representem determinados fenômenos naturais, como por exemplo o ciclo das estações do ano e os eclipses da Lua e Sol. Caso os modelos não sejam satisfatórios, eles são aperfeiçoados no decorrer da história. Ou seja, a Astronomia aceita uma evolução na sua organização de idéias enquanto que a Astrologia continua estagnada em seus conceitos desde os tempos dos babilônios.

### 1.3 QUAL É A DIFERENÇA ENTRE ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA?

O conhecimento científico acerca do cosmos tornou-se complexo no decorrer da história de tal maneira que foi necessário dividir a Astronomia em diversas áreas, sendo que os grandes ramos são a Astronomia Fundamental, a Mecânica Celeste, a Astrofísica e a Cosmologia.

A Astronomia Fundamental faz o estudo das posições dos astros no céu e dos sistemas de referência além de ditar a passagem do tempo através dos calendários e prever fenômenos cíclicos como as fases da Lua e os eclipses da Lua e do Sol. A Mecânica Celeste realiza o estudo da cinemática dos astros principalmente de satélites, planetas, asteróides e cometas no Sistema Solar. A Astrofísica estuda a física e a composição química dos astros assim como a formação, estrutura e a evolução dos mesmos, incluindo os corpos do Sistema Solar, as estrelas e as galáxias. A Cosmologia agrega muitos conhecimentos das demais e sintetiza o estudo da formação, estrutura e evolução do universo como um todo.

#### 1.4 PERCEPÇÃO DO TEMPO NA ASTRONOMIA

As primeiras organizações sociais humanas precisavam medir a passagem do tempo em inúmeras atividades práticas, tais como: saber a época certa para plantar uma determinada cultura vegetal, antecipar as estações de cheia e vazante de um rio e conhecer as datas das celebrações religiosas. A necessidade, então, de elaborar um calendário era óbvia. Por incrível que pareça, a primeira marcação de tempo ocorreu para períodos longos (meses e anos) e não para intervalos curtos (dias e horas).

Os povos antigos necessitavam também conhecer o espaço geográfico local, com a finalidade de se deslocarem quando necessário. Além do mais, quando a pesca, a caça e o comércio envolviam grandes distâncias, a necessidade de conhecer o caminho de ida-e-volta era óbvia. Usavam as estrelas e constelações durante a noite ou o Sol durante o dia para conhecer a orientação dos pontos cardeais de um lugar.

Desta forma, a elaboração de calendários para prever os inícios de estações, as datas religiosas e as ocasiões de certos fenômenos assim como a necessidade de conhecer o rumo em deslocamentos sobre a superfície terrestre foram marcos importantes para o nascimento e a evolução inicial da Astronomia.

Os primeiros astrônomos concluíram que o Sol se movia lentamente contra o fundo do céu, definido pelas estrelas e constelações após a observação sistemática dia após dia.

Esse movimento cíclico, denominado movimento anual aparente do Sol, faz com que este se desloque cerca de 1 grau por dia (de oeste para leste). Esse ciclo deu origem ao ano solar que tem 365,2422 dias (365 dias, 5 horas, 48 minutos e 46,08 segundos).

A observação persistente da mudança do aspecto da Lua fez notar que o intervalo de tempo entre duas fases iguais e consecutivas corresponde a 29,53059 dias. Esse período lunar é denominado de lunação (ou período sinódico da Lua). O conceito de mês surgiu desse fenômeno astronômico.

O conceito de semana de 7 dias originou-se da duração de cada período lunar marcante ou provavelmente do culto diário aos sete astros errantes feito pelos babilônios. O domingo era dedicado ao Sol, segunda-feira à Lua, terça a Marte, quarta a Mercúrio, quinta a Júpiter, sexta a Vênus e sábado a Saturno. As nomeações dos dias da semana em várias línguas contemporâneas (ex. espanhol, francês, inglês e alemão) originaram-se dos nomes em latim desses astros (*Solis, Lunae, Martis, Mercurie, Jovis, Veneris e Saturni* respectivamente). A língua portuguesa não seguiu essa denominação para os dias da semana porque sofreu influência do cristianismo.

No transcorrer de um dia, atualmente dividido em 24 horas, nossos ancestrais faziam poucas divisões: manhã, meio do dia, tarde, início da noite, meio da noite e fim da noite. A observação do deslocamento do Sol era adotada na parte clara do dia. O deslocamento das estrelas mais brilhantes era aplicado para a subdivisão da noite. A primeira definição de dia veio da observação do movimento do Sol no céu, que corresponde ao dia solar. Além do mais, por questões práticas, o homem sentiu a necessidade de criar uma ordenação matemática para o dia/noite, visto que nós possuímos um relógio biológico interno completamente adaptado ao ciclo diário do Sol.

O dia solar corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas do Sol pelo meridiano celeste do lugar, uma linha imaginária no céu que une os pontos cardeais norte e sul passando pelo zênite Z (ponto imaginário no céu diametralmente oposto ao centro da Terra, vide Figura 10.2). Por convenção, o dia solar apresenta 24 horas solares.

## 1.5 METODOLOGIA CIENTÍFICA: COMO FAZER CIÊNCIA

A civilização grega clássica (600 a.C.) foi a sociedade antiga que mais avançou em Astronomia e em outras áreas do conhecimento humano como filosofia, matemática e artes. Pode-se afirmar que a ciência ocidental se originou com os antigos gregos. Eles conceberam dois ideais de cientificidade: o racionalista e o empirista.

A concepção racionalista, aplicada até o final século XVII, diz que a ciência é um conjunto de conhecimentos racionais, dedutivos e demonstráveis (como a matemática). Tales de Mileto (600 a.C.) e Pitágoras (550 a.C.) são exemplos típicos de cientistas racionalistas que definiam *a priori* os objetos de estudo e suas leis, para deduzir *a posteriori* suas propriedades e seus efeitos.

A concepção empirista (usada até fins do século XIX) é exatamente o contrário. Ela afirma que a ciência é construída a partir das interpretações dos fatos observados e de experimentos de seus objetos de estudo. Aristóteles (350 a.C.) foi quem realmente elaborou esta linha de ação científica. Os cientistas elaboravam suas teorias após as observações dos fatos naturais (ou experimentos). Portanto, a concepção empirista é hipotética-indutiva.

Resumidamente, para o racionalismo os experimentos vêm após a formulação de uma teoria e para o empirismo as observações são realizadas antes da elaboração teórica.

Nos tempos atuais, outra concepção é adotada: a construtivista (iniciada no século XX). Ela combina o racionalismo com o empirismo, aceitando inclusive a reformulação da teoria a partir dos resultados das observações e experimentos. A diferença marcante entre os dois primeiros tipos de cientificidade e o construtivismo é quanto à concepção elaborada para a realidade. Enquanto que tanto para a concepção racionalista como para a concepção empirista, a teoria científica representa fielmente a realidade observada, para a concepção construtivista a teoria apenas representa um modelo interpretativo da realidade (e não a realidade em si).

Mas afinal, o que é uma teoria científica? É um conjunto ordenado e coerente de proposições baseadas em um pequeno número de leis, com a finalidade de descrever, explicar e prever fatos observáveis.

## 1.6 INÍCIO DA ASTRONOMIA MODERNA

Com o renascimento europeu associado às grandes viagens de navegação, a Ciência alavancou seu crescimento proporcionando a primeira revolução científica. Nicolau Copérnico (1473-1543), Tycho Brahe (1546-1601), Galileu Galilei (1564-1642) e Johannes Kepler (1571-1630) foram os principais astrônomos dessa época. Copérnico (inspirando-se nas idéias do grego Aristarco de 270 a.C.) estabeleceu o heliocentrismo para o universo, de modo que o Sol seria o seu centro e não mais a Terra. A idéia de esferas celestiais para cada planeta e para as estrelas era, ainda, assumida. Somente a esfera da Lua era centrada na Terra. Assim, explicava-se muito melhor os movimentos "irregulares" para os planetas por meio de um modelo científico mais simples. Os movimentos aparentes do Sol (diário e anual), também, eram explicados satisfatoriamente. Além do mais, ele admitia que a distância Terra-Sol era bem menor do que o tamanho da esfera das estrelas (consideradas fixas ainda).

Contudo, faltavam ainda observações cuidadosas para testar e comprovar o sistema de Copérnico. Giordano Bruno, um filósofo, difundiu as idéias copernicanas por toda a Europa acrescentando algumas próprias. Giordano afirmava que o Sol era apenas o centro do sistema dos planetas; devendo ser uma estrela como aquelas observadas no céu noturno. As estrelas deveriam existir aos milhões estando distribuídas, não mais numa esfera, mas sim num espaço ilimitado. Em torno das estrelas poderiam existir planetas habitados como o nosso.

As observações astronômicas mais precisas feitas até aquela época para os movimentos aparentes dos planetas correspondem às aquelas de Tycho Brahe. Foi Kepler quem tirou proveito dos dados astronômicos de Tycho Brahe. A partir da análise e interpretação dos dados obtidos para os movimentos planetários (concepção empirista), Kepler formulou três leis empíricas: (i) os planetas movem-se ao redor do Sol em trajetórias elípticas, de modo que o Sol não ocupa o centro das elipses mas sim o foco das mesmas, (ii) cada segmento de reta Sol-planeta "percorre" áreas iguais em intervalos de tempos iguais significando que cada planeta adquire maior velocidade quando está mais próximo do

Sol e (iii) o quadrado do período de translação de cada planeta em torno do Sol é diretamente proporcional ao cubo da distância média do mesmo ao Sol. Por curiosidade, Kepler estava entusiasmado em obter com precisão as posições dos planetas no céu (por entre as constelações do Zodíaco) com a finalidade de aplicá-las na elaboração de horóscopos astrológicos.

A invenção do telescópio é creditada a Hans Lippershey (1570-1619), contemporâneo de Galileu que popularizou seu uso. Os telescópios daquela época eram bem simples, consistindo de duas lentes (objetiva e ocular) alinhadas por meio de um tubo de maneira a formar uma imagem aumentada do objeto de estudo. Eram os telescópios refratores ou, simplesmente, lunetas. Galileu, usando suas lunetas com aumento de até 32 vezes, observou as crateras e montanhas da Lua, os quatro maiores satélites de Júpiter, as fases de Vênus, as manchas do Sol e as estrelas da Via Láctea. Os anéis de Saturno não foram descobertos por Galileu devido à qualidade limitada de suas lunetas (ele pensou que este fosse um planeta triplo). Muito cuidado ao observar o Sol! Nunca observe-o diretamente com binóculos ou lunetas. O conveniente e seguro é fazer uma projeção da imagem do Sol num anteparo ou parede. Galileu perdeu parte da visão ao olhar o Sol através de sua luneta sem o cuidado necessário.

Mesmo com as observações de Kepler e Galileu, que favoreciam o modelo geocêntrico, não foi fácil a aceitação das idéias envolvidas. Nem a Terra nem o Homem estariam mais no centro do universo, muito embora outros mundos estivessem sendo descobertos (ex. Júpiter com suas luas e as estrelas do caminho leitoso do céu, a Via Láctea). Para evitar as penalidades da inquisição como acontecera com Giordano Bruno (tortura e fogueira), Galileu renunciou suas idéias. Terminou por passar o resto de sua vida em prisão domiciliar. As novas idéias científicas revolucionárias somente foram aceitas definitivamente cerca de 2 séculos adiante, após a formulação das leis do movimento e da teoria da gravitação universal de Isaac Newton (1642-1727). Esse foi o marco inicial da Astronomia moderna, ou melhor, do surgimento de outras vertentes dentro da Astronomia. O grande avanço na teoria de Newton foi a universalidade das leis que descrevem o movimento de um corpo conjugada a uma linguagem matemática

inovadora (o cálculo diferencial e integral). A universalidade da gravitação e leis de Newton diz que elas são aplicáveis em qualquer local do universo seja na Terra, na Lua ou numa galáxia distante.

## **2 NOÇÕES SOBRE ESPAÇO**

### **2.1 ESPAÇO GEOMÉTRICO**

Podemos classificar o espaço geométrico de acordo com o seu número de dimensões físicas.

Pense num ser ou numa entidade física qualquer que só consegue se deslocar num local apenas da esquerda para direita e vice-versa, ou de cima para baixo e vice-versa, ou melhor, de um lado para o outro e vice-versa. Dizemos que esse local apresenta apenas uma dimensão; estamos considerando então um espaço unidimensional como uma reta ou um fio bem esticado extremamente fino. A referência nesse espaço é um ponto qualquer da reta, convencionalmente denominado de origem. Basta apenas uma coordenada (em qualquer unidade de comprimento) para localizar outro ponto qualquer em relação à origem do sistema de referência. Nesse caso, essa coordenada é a distância do ponto até a origem ou simplesmente a posição dele.

Agora, um ser ou entidade física consegue ter mais liberdade de movimento. Por exemplo, ele pode ir para esquerda e para direita assim como para frente e para atrás. Assim, ele estará num plano horizontal deslocando-se em duas dimensões desse espaço.

Se ele pode ir para um lado e para outro (seja esquerda-direita ou frente-atrás) assim como para cima e para baixo, dizemos que ele está num plano vertical. Tem-se liberdade de movimento em duas direções independentes. Esse espaço é classificado como bidimensional. É idealizado geometricamente como um plano e denominado de espaço euclidiano ou cartesiano. Um lençol bastante esticado numa cama, uma tela de cinema e a folha de um livro são exemplos. A referência para se localizar um ponto

qualquer nesse espaço continua sendo um ponto arbitrário, denominado de origem novamente. Porém, duas coordenadas são necessárias para determinar a localização dele. Convencionalmente, adota-se duas retas ortogonais entre si cuja interseção é escolhida como a origem desse sistema de duas coordenadas (a abscissa e a ordenada ou os eixos  $x$  e  $y$  respectivamente). Cada uma das coordenadas corresponde à distância do ponto até cada um dos eixos ou posição sobre o eixo respectivo: a abscissa é a distância até o eixo  $y$  (ou posição sobre o eixo  $x$ ) e a ordenada é a distância ao eixo  $x$  (ou posição sobre o eixo  $y$ ).

Caso esse ser ou entidade física tenha mais liberdade ainda de movimento, a próxima classificação de espaço é a tridimensional. O interior de uma sala e de uma caixa são exemplos. A referência para se localizar um ponto qualquer nesse espaço continua sendo um ponto arbitrário, denominado de origem novamente. Três coordenadas são necessárias para determinar a localização do mesmo. Por convenção, adota-se três retas ortogonais entre si cuja interseção é escolhida como a origem desse sistema de três coordenadas (os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente). Novamente, cada uma das coordenadas corresponde à distância do ponto até cada um dos planos formados pelos outros eixos ou posição sobre o eixo respectivo.

Em nosso cotidiano, vivemos num espaço de três dimensões físicas de comprimento e uma de tempo. Pode-se dizer, então, que estamos num espaço-tempo de quatro dimensões.

## 2.2 ESPAÇO SIDERAL

Como podemos dividir o espaço sideral? Pode-se adjetivar o espaço sideral segundo sua distância à Terra: (a) espaço interplanetário, (b) espaço interestelar e (c) espaço intergaláctico.

O espaço interplanetário corresponde àquele existente entre os corpos do Sistema Solar e aos seus próprios componentes. É investigado através de observações terrestres, de satélites científicos e de missões espaciais por sondas.

O espaço interestelar ainda não foi investigado *in loco* pelo Homem. É aquele compreendido basicamente pelas estrelas, pelo gás, pela poeira e pelos campos elétrico e magnético existentes na nossa galáxia. É investigado através de observações terrestres e de satélites científicos de observação astronômica e astrofísica.

O espaço intergaláctico está associado às outras galáxias, aglomerados de galáxias e ao meio existente entre elas. Novamente, ainda não foi investigado *in loco* pelo Homem e é estudado através de observações terrestres e de satélites científicos de observação astronômica e astrofísica.

### **3 ESFERA CELESTE**

Qualquer pessoa ao observar o céu de um local descampado percebe que está no centro de um grande hemisfério celeste. Esse tipo de visualização do céu contribuiu para a concepção do geocentrismo. O céu na Astronomia é idealizado como uma grande esfera, a esfera ou abóbada celeste, que está centrada na Terra (Figura 1).

#### **3.1 MOVIMENTO DOS ASTROS NO CÉU**

O movimento dos astros no céu, ao longo de um dia ou uma noite, ocorre de leste para oeste. Dizemos que é um movimento aparente, porque não são os astros que se movem, mas sim a Terra que gira de oeste para leste. A Figura 1 mostra que a esfera celeste parece girar no sentido contrário ao da rotação da Terra. Da mesma forma que na Terra, existem na esfera celeste os pólos norte e sul, definidos como sendo as interseções imaginárias do eixo de rotação terrestre com o céu. O equador celeste, que divide o céu em duas metades, nada mais é que uma projeção do equador terrestre na abóbada

celeste. A trajetória de um determinado astro durante seu movimento diário aparente ocorre paralelamente ao equador celeste, como pode ser visto nas Figuras 1 e 2.

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

Se estivermos fora do equador ou de um dos pólos terrestres (como é o caso de São José dos Campos), perceberemos que as trajetórias aparentes diárias dos astros ocorrem em planos oblíquos ao plano do horizonte. Veja a Figura 2. O plano do equador celeste apresentar-se-á também com a mesma obliquidade relativa ao horizonte. O pólo celeste, correspondente ao hemisfério onde a pessoa se situa, fica elevado no céu, e o outro, abaixo do horizonte. Os astros ficam uma parte do dia visíveis acima do plano do horizonte e a outra parte abaixo do mesmo, em períodos desiguais. Certos astros próximos do pólo celeste elevado ficam sempre acima do horizonte (aparentemente girando em torno desse pólo) e uma parte do céu próxima ao outro pólo celeste nunca é visível.

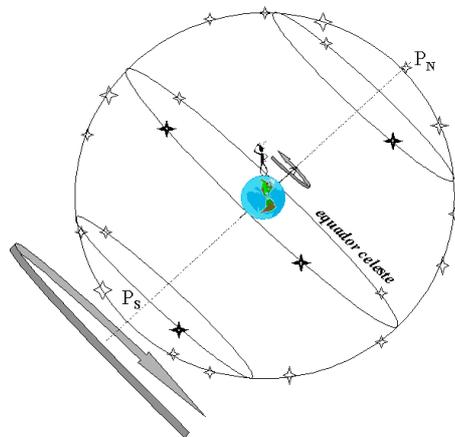


Fig. 1 - A esfera celeste: uma visão geocêntrica do universo.

FONTE: Milone (1999, p. 1-21)

### 3.2 COORDENADAS CELESTES HORIZONTAIS LOCAIS

Imagine-se, novamente, num local plano e horizontal como uma planície ou em alto mar. A parte da esfera celeste visível é a aquela acima do horizonte do lugar concebido como um plano. A fim de localizarmos um astro no céu, bastam duas coordenadas medidas em unidades de ângulo.

O espaço idealizado pela esfera celeste é uma superfície esférica côncava (bidimensional) de modo análogo à superfície da Terra se o relevo terrestre for desprezado (a altitude não é levada em conta). No caso da esfera celeste, analogamente não precisamos ter a distância do astro (outra coordenada a mais) apenas sua direção ou posição na superfície curva do céu (duas coordenadas). A diferença essencial entre as coordenadas celestes e geográficas é que medimos a direção de um astro de "dentro" da esfera celeste enquanto que a localização de um ponto sobre a superfície da Terra é visualizada por "fora" do globo terrestre (superfície esférica convexa).

O sistema de coordenadas celestes horizontais locais apresenta, então duas coordenadas angulares: a altura e o azimute. A altura (angular) do astro no céu é contada a partir do

plano do horizonte seguindo um círculo vertical até o astro, variando de  $0^\circ$  a  $+90^\circ$ . O azimute (angular) do astro é contado sobre o círculo do horizonte a partir do ponto cardinal norte para o leste até a circunferência vertical que passa pelo astro, indo de  $0^\circ$  a  $+360^\circ$ . Nesse sistema de referência, as coordenadas horizontais de um astro qualquer mudam continuamente durante o seu movimento diário aparente.

### 3.3 COORDENADAS CELESTES EQUATORIAIS

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

É importante notar que as coordenadas equatoriais de um astro não são modificadas com o movimento diário aparente porque elas são fixas à esfera celeste. Caso um astro tenha suas coordenadas equatoriais alteradas de forma acentuada, esse astro apresentará um movimento próprio (peculiar). Devido à proximidade, a Lua, o Sol e os planetas modificam continuamente essas coordenadas. Algumas estrelas não muito distantes e com movimentos peculiares não desprezíveis também tem suas coordenadas alteradas lentamente. Certas correções nessas coordenadas são feitas em função de movimentos conhecidos de nosso planeta (a precessão é o mais importante). Estrelas próximas apresentam uma mudança de coordenadas em torno de um valor médio devido ao movimento de translação da Terra em torno do Sol.

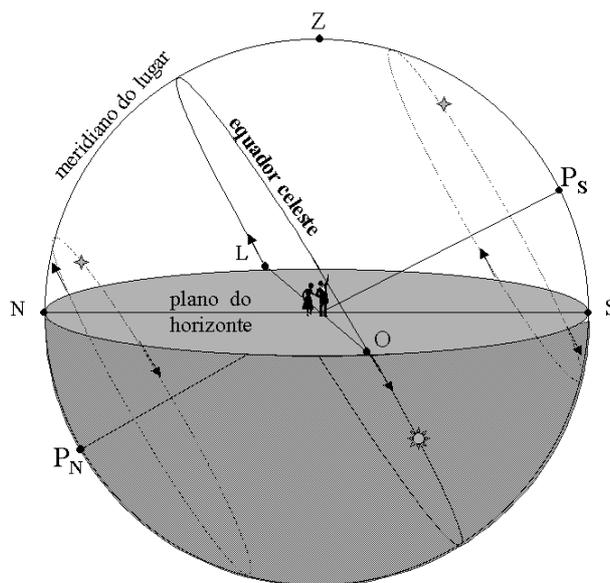


Fig. 2 - Visão topocêntrica da esfera celeste a partir de um local entre o equador e o pólo sul.

FONTE: Milone (1999, p. 1-27)

#### 4 NOÇÕES SOBRE ESTRELAS E OBJETOS EXÓTICOS EM ASTROFÍSICA

Uma estrela, durante a sua vida normal, é um sistema que está em equilíbrio. A tendência da estrela encolher por causa da sua auto-gravidade é equilibrada pela pressão exercida pelo material quente que a constitui. Esse material é aquecido pelas reações nucleares que ocorrem no interior da estrela, que por sua vez ocorrem devido às imensas pressões e temperaturas do seu interior. O que acontece quando uma estrela consome todo o seu combustível nuclear? Uma estrela como o nosso Sol leva cerca de 10 bilhões de anos transformando hidrogênio em hélio no seu interior. É essa reação nuclear que fornece a energia que o Sol emite em forma de luz. O Sol já está queimando hidrogênio a 5 bilhões de anos e vai continuar a fazer isso por mais 5 bilhões de anos. Quando o hidrogênio acabar, a fornalha no interior do Sol vai começar a queimar o hélio e formar elementos progressivamente mais pesados. Como essas reações são mais energéticas, o Sol vai se expandir e se transformar numa gigante vermelha, uma estrela tão grande que vai engolir a Terra, ou seja, o seu raio vai ser maior do que a distância do Sol até aqui.

Após essa fase, que dura centenas de milhões de anos, a estrela irá se contrair e não haverá mais geração de energia nuclear para equilibrar a estrela, que então encolhe até um tamanho aproximadamente igual ao da Terra. Nessa configuração, os elétrons e os núcleos que constituem o material da estrela estão o mais próximo possível uns dos outros, como se os átomos estivessem se tocando. O nosso Sol agora é uma *anã branca*: uma estrela "morta", de cor branca, com um raio cerca de 100 vezes menor do que o do Sol atual e que vai lentamente se apagando. Uma colher de chá de material dessa estrela pesa o mesmo que 5 elefantes.

As anãs brancas são os cadáveres estelares de estrelas que tinham massa até aproximadamente 5 vezes a massa do Sol. Se a massa da estrela é maior do que isso, o seu fim será bem mais dramático. Após a fase de gigante ou supergigante vermelha, a estrela irá implodir com tamanha força que os elétrons serão forçados a penetrar no núcleo e interagir com os prótons, formando partículas denominadas neutrons (que não têm carga elétrica). E não é só isso: as camadas externas da estrela explodem violentamente, ejetando material a velocidades altíssimas no meio interestelar. Essas explosões são chamadas de *supernovas*. O que restou da estrela agora se transformou num núcleo atômico gigantesco formado quase que completamente de neutrons: são as *estrelas de neutrons*. Esses objetos têm uma massa um pouco maior que a do Sol e um raio de apenas 10 km! Uma colher de chá do material de uma estrela de neutrons pesaria o mesmo que o peso combinado de  $\approx 10^{25}$  da população da Terra! As estrelas de neutrons geralmente giram rapidamente, às vezes dando uma volta completa em alguns milésimos de segundo! Isso pode produzir um espécie de farol espacial: a cada volta da estrela, vemos um pulso de luz (geralmente essa luz não cai na faixa que é visível pelo olho humano; ela está na forma de ondas de rádio). Quando isso acontece, a estrela de neutrons recebe o nome de *pulsar*, e os pulsos observados se repetem com incrível precisão, melhor do que a de qualquer relógio construído por nós.

Quando uma estrela de grande massa explode como uma supernova, a formação de uma estrela de neutrons não é o único destino que o caroço central da estrela pode ter. Pode ser pior. A implosão pode ser tão violenta que nem mesmo a pressão exercida pelos -

neutrons é capaz de ganhar da gravidade, que está empurrando tudo para dentro. A estrela pode implodir infinitamente, formando o que ficou conhecido como *buraco negro*, um objeto tão denso, e de campo gravitacional tão intenso, que nem mesmo a luz pode escapar dele! Um buraco negro típico, com uma massa aproximadamente igual à do Sol, pode ser imaginado como um ponto de densidade infinita circundado por um "horizonte de eventos", uma esfera de 3 km de raio de dentro da qual nada sai, só entra.

Qualquer objeto que cruze o horizonte de eventos de um buraco negro perde definitivamente a sua identidade e a sua conexão com o resto do universo. Ele serve apenas para aumentar a massa do buraco negro. Embora não se possa observar diretamente um buraco negro, existem hoje muitas evidências de que eles realmente existem no universo. Em alguns sistemas binários, estrelas estão orbitando companheiras invisíveis quem têm massas muitas vezes maiores do que as massas possíveis para anãs brancas e estrelas de neutrons. Esses objetos quase certamente são buracos negros. Na região central de muitas galáxias, a matéria interestelar está desaparecendo misteriosamente quando se aproxima do centro. Acredita-se que um buraco negro gigante, de massa que pode se de um milhão a um bilhão de massas solares, esteja devorando esse material. Existem evidências de que esses buracos negros gigantes sejam os responsáveis pelo fenômeno dos *quasares*, objetos extremamente afastados da nossa Galáxia e que emitem enormes quantidades de energia numa região do tamanho do nosso sistema solar. Esses objetos emitem, por segundo, mais energia do que o Sol emite em 1000 anos.

Para completar o nosso breve passeio pelo zoológico cósmico, restou comentar a respeito do fenômeno mais violento de todos: os "bursts" de raios-gama. Esses eventos são explosões que ocorrem em galáxias muito distantes, cada um emitindo, tipicamente em alguns segundos, mais energia do que o Sol vai emitir na sua vida inteira de 10 bilhões de anos. Essa incrível energia é expelida na forma de raios-gama, uma forma de luz muito mais energética e penetrante do que a luz visível aos nossos olhos. A natureza exata do que produz essas explosões é desconhecida, mas hoje acredita-se que o mais

provável é que elas resultem de colisões entre estrelas de neutrons ou de uma estrela de neutron com um buraco negro.

## 5 INSTRUMENTOS ASTRONÔMICOS

O instrumento de observação astronômica mais rudimentar é a própria visão humana. Os nossos 2 olhos, trabalhando em conjunto com o nosso cérebro, é um magnífico detector e imageador de radiação eletromagnética, o nome científico para o que chamamos de luz. A radiação eletromagnética é constituída por ondas formadas pela vibração de campos elétricos e magnéticos, e se propaga no espaço a uma velocidade de 300.000 km/s (o que equivale a dar 7 voltas na Terra, pela linha do equador, em apenas 1 segundo). Assim como ocorre com as ondas formadas na água quando atiramos uma pedra num lago, as ondas eletromagnéticas formam cristas e vales, e a distância entre duas cristas é chamada de comprimento de onda. Os nossos olhos enxergam numa faixa de comprimentos de onda de 4000 a 7000  $\text{\AA}$ , denominada faixa do visível (1  $\text{\AA}$  é 10 milhões de vezes menor do que 1 mm). Quando olhamos para o céu à noite, somos capazes de ver estrelas 1500 vezes mais fracas que Sirius, a estrela mais brilhante do céu, e podemos identificar estrelas que estejam separadas de 1 minuto de arco, o que significa que a resolução da nossa visão permite que sejamos capazes de ver, por exemplo, um objeto do tamanho de uma moeda de R\$1,00 a 70 metros de distância.

Embora os nossos olhos sejam essa maravilha toda, eles são muito limitados como instrumentos astronômicos. Primeiro, porque detectam pouca luz, já que o diâmetro de nossa pupila adaptada ao escuro é de apenas 7 mm, o que significa que os nossos olhos têm uma pequena área coletora de luz. Em segundo lugar, porque só vêem uma pequena fração, em comprimento de onda, da luz que vem dos astros (a faixa do visível). Além disso, a atmosfera da Terra absorve e espalha significativamente essa luz, de forma que a observação dos astros aqui da superfície da Terra é muito limitada. Em função disso, os astrônomos desenvolveram, ao longo da História, engenhosos instrumentos, cada vez mais sofisticados, que são capazes de detectar e analisar a

radiação eletromagnética, em diversos comprimentos de onda, emitidas por uma grande variedade de objetos celestes.

Para algumas faixas do espectro eletromagnético, a atmosfera é inteiramente opaca, como por exemplo as faixas do ultravioleta e raios-X, nas quais o comprimento de onda é menor do que na faixa do visível, e grande parte do infravermelho, de comprimento de onda maior do que na faixa do visível. A radiação infravermelha é aquela emitida por corpos aquecidos, e também é conhecida como radiação de calor. Uma outra importante faixa do espectro é a faixa das ondas de rádio, na qual muitas descobertas importantes foram feitas, como por exemplo os pulsares.

O mais tradicional instrumento utilizado para se observar o universo é o telescópio óptico, geralmente construído em locais secos e de grande altitude - para minimizar a interferência da atmosfera - e afastados de grandes cidades para evitar a poluição luminosa. Os telescópios mais modernos possuem espelhos primários com diâmetros de 10 metros, o que significa que as suas áreas coletoras de luz são 2 milhões de vezes maiores do que a dos nossos olhos. Isso, em conjunto com o uso de um bom detector de luz no foco do telescópio, permite que esses instrumentos detectem estrelas cerca de 5 bilhões de vezes mais fracas que as que o nosso olho consegue ver. Os outros grandes telescópios que operam na superfície da Terra são radiotelescópios, que detectam a emissão de rádio proveniente de uma grande variedade de objetos astrofísicos, tais como quasares, pulsares e nebulosas onde são formadas estrelas. O uso em conjunto de vários radiotelescópios situados em diferentes continentes permite obter uma resolução 60 mil vezes melhor do que a do nosso olho, ou seja, com essa resolução poderíamos ver, a olho nu, um carro andando na Lua.

## **6 MEDIDAS EM BALÕES E SATÉLITES**

Em comprimentos de onda fora da faixa do visível, muitas vezes é necessário colocar os detectores fora da atmosfera terrestre, em satélites ou sondas espaciais, ou, pelo menos, em balões que sobem até a estratosfera, onde o ar já é tão rarefeito que a absorção

atmosférica é muito pequena. A Divisão de Astrofísica do INPE tem tradição no desenvolvimento de experimentos que detectam raios-gama vindos de fontes cósmicas.

Raios gama é a denominação que se dá à radiação eletromagnética de altíssima energia, correspondendo a comprimentos de onda muito pequenos. Essa radiação é extremamente penetrante e exige uma tecnologia especial para ser detectada. Esses experimentos são montados em cargas úteis de balões e levados a aproximadamente 40 km de altura para fazer as medidas. Os balões são confeccionados com um plástico extremamente fino e, quando totalmente inflados de gás (hidrogênio ou hélio), podem chegar a ter um diâmetro igual ao tamanho de um campo de futebol. Durante um vôo de aproximadamente 20 a 40 horas (dependendo da intensidade dos ventos estratosféricos), as medidas são feitas pelos detectores a bordo e enviadas para a terra via rádio. É enviado então um comando de terra (também via rádio) que separa o balão da carga útil. O experimento científico então cai de pára-quedas e é recuperado no solo pela equipe de resgate.

Para se medir raios-X, radiação ultravioleta e infravermelha, é necessário colocar os telescópios e detectores em satélites, para que fiquem inteiramente livres da absorção atmosférica. Atualmente, existe um grande número de satélites científicos em órbita. Dentre eles, vale a pena destacar o Hubble Space Telescope, um telescópio óptico com um espelho de 2,4 m lançado em 1990 pelo space shuttle *Discovery*. Embora um de seus espelhos tenha sido construído com defeito, o Hubble foi posteriormente consertado em órbita (foi colocada uma lente corretora, e passou-se a dizer que o Hubble passou a usar óculos!). Ele já obteve imagens espetaculares dos mais diversos objetos astrofísicos, como estrelas em formação, galáxias em interação e nuvens gigantescas de gás na nossa Galáxia. (Veja informações em Inglês sobre o Hubble na Internet em <http://www.stsci.edu/hst>).

Outro satélite que merece destaque é o Chandra, recém lançado em julho de 1999 pelo space shuttle Columbia. O Chandra é um poderoso telescópio de raios-X que já está

obtendo novas e fascinantes informações sobre os objetos astronômicos emissores de raios-X, que estão geralmente associados a estrelas de neutrons ou buracos negros.

Dentre esses, podemos destacar sistemas binários em interação (nos quais uma estrela de neutrons ou um buraco negro captura vorazmente matéria de uma estrela companheira), núcleos ativos de galáxias e quasares, ou gases superaquecidos em aglomerados de galáxias. (Veja informações em Inglês sobre o Chandra na Internet em <http://chandra.harvard.edu>).

## 7 BIBLIOGRAFIA

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

Chaui, M. **Convite à Filosofia**: 5<sup>a</sup> ed., Ed. Ática. São Paulo, 1995.

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

Milone, A. de C. A Astronomia no dia-a-dia. In: **Introdução à Astronomia e Astrofísica**, INPE-7177/PUD-38, Divisão de Astrofísica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, MCT. São José dos Campos, 1999.

Rodrigues, C. V. O Sistema Solar. In: **Introdução à Astronomia e Astrofísica**, INPE-7177/PUD-38, Divisão de Astrofísica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, MCT. São José dos Campos, 1999.