

Introdução à Astrofísica – as medidas físicas em escala astronômica

Introduction to Astrophysics – the physical measurements in astronomical scale

Carlos Alberto Stechhahn da Silva, Simone Seixas Picarelli, Marco Antonio Ferreira Lima, Jairo Gonçalves Duarte.

- Carlos Alberto Stechhahn da Silva é doutor em física pela Universidade de São Paulo (USP) e professor da Faculdades Integradas Campos Salles. E-mail: stecphysics@gmail.com

- Simone Seixas Picarelli é doutora em física pela Universidade de São Paulo (USP) e professora da Faculdades Integradas Campos Salles. E-mail: simone.picarelli@gmail.com

- Marco Antonio Ferreira Lima é mestre em Controladoria e Contabilidade pelo Centro Universitário Álvares Penteado (FECAP) e professor da Faculdades Integradas Campos Salles. E-mail: mafsp72@gmail.com

- Jairo Gonçalves Duarte é bacharel, mestre em Administração e Professor da Faculdades Integradas Campos Salles. E-mail: jairo.gd@gmail.com

RESUMO

Neste trabalho são mostradas as técnicas para o cálculo da distância de uma estrela até nós. Com o uso do EXCEL e dos conceitos de magnitude aparente e absoluta, bem como do brilho de uma estrela, são construídas duas tabelas para as estrelas *Sirius*, *Canopus*, *Alfa Centauro*, *Vega* e *Capella*, e para o nosso Sol. Numa delas expressamos a distância da estrela e, na outra, a relação entre seus respectivos brilhos. É aqui apresentado um breve resumo da história e dos primeiros passos que conduziram à astrofísica até seu moderno desenvolvimento atual e a importância e relevância da espectroscopia na astrofísica.

Palavras chave: Astrofísica, Astronomia, medidas físicas, paralaxe, parsec, distância, magnitude aparente, magnitude absoluta, brilho de uma estrela.

ABSTRACT

In this work are shown the techniques for calculating the distance of a star to us. With the use of EXCEL and the apparent and absolute magnitude concepts, as well as the brightness of a star, are built two tables to the star *Sirius*, *Canopus*, *Alpha Centauri*, and *Capella*, as well as to our Sun. One of them we distance from Star and on the other one, the relationship between their respective brightness. Here is presented a brief summary of the story and of the first steps that led to your current development up to modern astrophysics and the importance and relevance of spectroscopy in Astrophysics.

Key words: Astrophysics, Astronomy, physical measurements, Parallax, parsec, distance, apparent magnitude, absolute magnitude, brightness of a star.

INTRODUÇÃO

Os primeiros seres que habitavam a terra precisavam ter a noção de tempo e espaço. O ato de medi-los se iniciou de modo intuitivo. Saber a distância mínima que poderia ficar de um animal predador e das velocidades envolvidas, para a presa e predador, era uma questão de sobrevivência; isto valia ainda quando da construção de seus rudimentares utensílios de caça. A vida seguia seu curso, seja durante o dia com o Sol ou à noite com as estrelas.

Não temos ainda o conhecimento pleno do início do uso das informações astronômicas pelo homem. Sabe-se que há monumentos na Inglaterra que datam de 5.000 a.C. e registros astronômicos do IV milênio a.C. (NETO; JATENCO-PEREIRA, 2017).

O estudo do universo, do movimento dos planetas e das estrelas, ao longo da história, trouxe às civilizações interpretação filosófica, religiosa e científica. O movimento de cometas e meteoros muitas vezes esteve associado ao “fim do mundo”. Muito embora, a extinção dos dinossauros esteja a eles agregados, os eclipses, o movimento e brilho de corpos celestes e a formação de desenhos no céu pelas estrelas foi usada tanto para uso técnico de orientação na navegação pelos oceanos, bem como associado às religiões e mitologias.

Segundo alguns estudiosos, a Bíblia é uma coleção de textos religiosos que data de 1.500 a.C – 450 a.C.

Em seu primeiro livro, a *Gênesis*, ela trata da origem do universo, das estrelas, da Terra e do homem.

Dessa forma, o estudo do cosmos passou por muitas civilizações em nosso planeta, ora causando terror, ora orientação para as construções que se fizeram, ou mesmo conduzindo às muitas reflexões do pensamento.

Hoje a “Cosmologia Moderna”, juntamente com áreas afins como a Astrofísica, estuda a origem do universo, da matéria e energia e sua dinâmica. Empregando grandes recursos financeiros e tecnológicos (radiotelescópios, satélites entre outros) ela busca ampliar a presença humana em ambientes cada vez mais distantes da Terra.

Este trabalho busca mostrar como são feitas na atualidade algumas das medidas em astrofísica.

Na sessão 1 é mostrada uma breve história da astrofísica estelar e a espectroscopia como ferramental básico para seu estudo. A Lei da Gravitação Universal é também deduzida.

A seguir, na sessão 2, é mostrado como se determinar o valor da distância da estrela até nós, bem como, seu brilho, luminosidade entre outras em astronomia. É introduzido o conceito de paralaxe e a unidade em astronomia para a medida da distância (*parsec*).

Os conceitos de brilho, luminosidade, cor, temperatura e magnitude de uma estrela é analisado.

Concluimos este trabalho, na seção 3, relacionando os conceitos de *magnitude aparente*, m , e brilho b de uma estrela. Mostraremos ainda como a *magnitude aparente* e a *magnitude absoluta*, M pode ser usada para calcular a distância até uma estrela.

A partir da magnitude aparente de duas estrelas é possível mostrar quantas vezes uma é mais brilhante que a outra.

1. ASTROFÍSICA ESTELAR – PRIMEIROS PASSOS

Para a maioria das pessoas, o estudo da astrofísica – ciência das estrelas, galáxias e do universo – é muito complexo e é área de dedicação apenas para pesquisadores, professores e cientistas de universidades (CARROLL; OSTILIE, 2007). No entanto, podemos assegurar que há objetos maravilhosos no cosmos que podem ser observados no céu noturno sem os complicados conceitos técnicos e teóricos da astrofísica.

Os astrônomos amadores fazem isto. Alguns jovens sobem no alto do prédio onde moram, e, nas imediações da caixa d'água, montam seus telescópios e procuram cometas, fazem medidas e se envolvem no ato de observar esses objetos brilhantes.

Mas nem sempre foi assim. Voltemos um pouco em nossa história.

O primeiro uso das estrelas, como sistema de referência, que se tem conhecimento foi feito pelos astrônomos do Antigo Egito na construção das pirâmides. Eles alinharam as pirâmides usando duas estrelas como referência. Tal descoberta foi feita por egiptólogos britânicos no sentido de tratar da precisão com que as mesmas foram construídas. As pirâmides do Vale de Gizé levaram cerca de dez anos para serem construídas (2.480 AC).

Desde os primórdios da civilização, ao se observar o sol, a lua e as estrelas, muitos caminhavam alheio às suas fulgurantes emanções.

Entretanto, pouco mais de dois mil anos depois da construção das pirâmides, a história iria registrar o primeiro cálculo envolvendo um corpo celeste.

Eratóstenes (276 a.C. – 194 a.C.) ficou famoso na antiguidade pelo método usado para determinar o tamanho da circunferência da Terra. Tornou-se, por este motivo, o primeiro homem a estimar o raio da Terra. Considerado o pai da geografia, Eratóstenes, nasceu em Cirene (antiga colônia da Grécia), hoje Líbia. Passou grande parte de sua vida em Alexandria, no Egito e foi diretor da Grande Biblioteca de Alexandria.

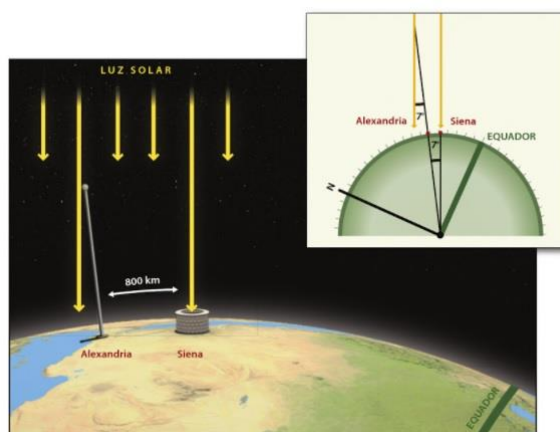
Desde sua infância, era um menino muito curioso e admirava a natureza ao seu redor. Fazia perguntas sobre tudo, o sol, as estrelas, os ventos, entre outras coisas (PEDROSO et al., 2010).

Por volta de 250 a.C, um viajante deu a ele uma informação astronômica muito importante. Ao meio-dia (21 de junho) do primeiro dia de verão, um poço bem profundo que ficava na cidade de Siena, a cerca de 800 km de Alexandria, ficaria completamente iluminado

pela luz do Sol (Sol no zênite). A partir desta informação, Eratóstenes realizou sua experiência em Alexandria (<http://www.zenite.nu/eratostenes-e-a-circunferencia-da-terra/>).

Para que possamos usar o teorema de Tales (duas retas paralelas cortadas por uma transversal) devemos assumir que os raios do Sol chegam paralelos até a Terra. Esta é uma aproximação válida. Os ângulos alternos internos (vide Figura 1 – região superior-direita em destaque) são iguais. Dessa forma, devido à esfericidade da Terra, o Sol produzia uma sombra em Alexandria, mas, estaria à pino em Siena.

Figura 1 – Esquema ilustrando a experiência de Eratóstenes para determinação do raio da Terra.



Fonte: J. GROTZINGER, T. JORDAN – Para entender a Terra – 6a. edição – BOOKMAN EDITOR LTDA. (2010).

Eratóstenes calculou para o comprimento da circunferência C da Terra um valor muito próximo do atualmente conhecido:

$$C = 50 \times \text{distância Siena-Alexandria} = 50 \times 800 \text{ km} = 40.000 \text{ km}.$$

O raio da Terra para Eratóstenes se tornou, então, trivial:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot R \Rightarrow R = \frac{C}{2 \cdot \pi} = \frac{40.000}{2 \cdot 3,14} \approx 6.370 \text{ km}$$

Com esta medida, Eratóstenes constrói um modelo científico para a Astrofísica no qual se pode afirmar:

“A Terra é uma esfera com raio de 6.370 km”.

Cálculos atuais da astronomia moderna mostram que a circunferência da Terra ao longo do equador é 40.075km, ou seja, o cálculo de Eratóstenes possui um erro de menos de 1%.

Outras realizações de Eratóstenes pode ser encontrada em (GROTZINGER; JORDAN, 2010).

Desde Aristóteles (384 – 322 a.C) até Cláudio Ptolomeu, século III d.C., considerava-se o modelo geocêntrico, ou seja, a Terra se encontraria estacionada no centro do universo e todos os outros corpos celestes girando ao redor da Terra. As estrelas, em seus modelos, estariam fixas constituindo um pano de fundo do céu.

A obra de Nicolau Copérnico (~ 800 – 1600) traz para a Europa do século XVI o modelo heliocêntrico do cosmos e começa, assim, a chamada “revolução copernicana” em 1543.

Tycho Brahe (1546 – 1601) possuía uma grande coleção de medidas astronômicas que foram coletadas ao longo dos anos. Johannes Keples (1571 – 1630) que as utilizou e serviu para que ele descobrisse as leis dos movimentos planetários, entre os anos de 1609 e 1619.

No renascimento europeu da astronomia, Galileu Galilei (1564 – 1642) aponta sua luneta para as estrelas em 1609. Descobre quatro satélites de Júpiter, manchas solares e crateras da lua.

Com Isaac Newton (1643 – 1727), conforme veremos, houve um período muito grandioso para a física e a matemática. Ele descobre as leis fundamentais da dinâmica e desenvolve a lei da gravitação universal.

A seguir, seu discípulo, Edmundo Halley (1656 – 1742) observa um cometa em 1682 e prevê a volta do mesmo em nosso céu em 1759. Confirma, assim, a lei da gravitação universal.

Muitos outros desenvolvimentos ocorreram dentro do campo da astronomia no período de (1600 – 1800) no chamado “Renascimento europeu da astronomia”. Descoberta das nebulosas, Uranometria (aliando astronomia à arte), descoberta da aparência espiral de nebulosas (galáxias semelhantes à Via Láctea). Os fundamentos da astronomia podem ser encontrados em (KARTTUNEM, et. al, 2006).

1.1 O INÍCIO DA ASTROFÍSICA

No período de (1850 – 1957) a fotografia conduz a novas ideias e horizontes na pesquisa do cosmos. As técnicas desenvolvidas a partir de 1850, com as imagens fotográficas e análises das linhas escuras do espectro do Sol (que foram identificadas com elementos químicos), marcam o início da astrofísica.

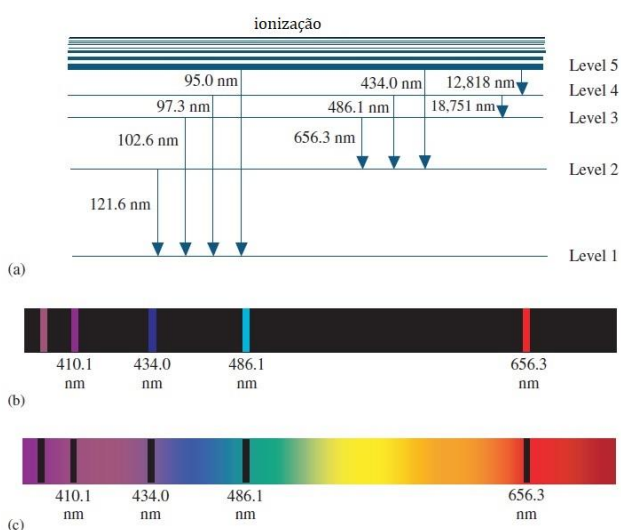
O Hélio, *He*, é o segundo elemento químico mais abundante no universo. Com o uso da espectroscopia este elemento foi primeiro descoberto no Sol e depois na Terra. A espectroscopia, ferramenta central da astrofísica, irá estudar e aperfeiçoar a física dos astros.

Basicamente, o espectro é um mapa da luz que vem de uma estrela. Diferentes cores de luz, ou seja, diferentes comprimentos de onda podem ser medidos (GIANCOLI, 2009). Estrelas vermelhas têm uma quantidade de luz no fim do espectro vermelho; o mesmo ocorre com as luzes na cor azul (região azul do espectro). Há ainda uma série de linhas escuras as quais são

chamadas de linhas de absorção. Elas são formadas na atmosfera da estrela. Em algumas raras situações há linhas brancas, as quais são chamadas de linhas de emissão. Tais linhas são raras em estrelas porém abundantes de nebulosas.

A física quântica irá explicar o movimento dos elétrons na superfície das estrelas e a consequente produção de fótons de luz (EISBERG, 1983).

Figura 2 – Análise do espectro da luz mostrando os níveis de energia para o átomo de hidrogênio. Em (a) é mostrado os comprimentos de onda dos vários níveis de energia de transição no hidrogênio. Em (b) o espectro mostra a linha de emissão visível que são transições que ocorrem a partir dos níveis de energia mais altos para o nível 2 (mais baixo). Em (c) o espectro mostra a linha de absorção que surge a partir do nível de energia 2 para níveis mais altos. Tais linhas de absorção e de emissão do hidrogênio são chamadas de *linhas de Balmer*.



Fonte: INGLIS, M. “Astrophysics is Easy! An introduction for the amateur astronomer” – Springer (2007).

1.2 ISAAC NEWTON E O MOVIMENTO DE OBJETOS NA TERRA E NO CÉU

No dia 25 de dezembro de 1642, no interior da Inglaterra, próximo à cidade de Cambridge, nasceu uma das mentes mais brilhantes que o mundo já produziu.

O filósofo natural, astrônomo e matemático Isaac Newton (1642 – 1727) formulou as três leis básicas do movimento em mecânica clássica e a Lei de Gravitação Universal.

O período de 1665 a 1666 foi muito fértil. Newton desenvolveu o teorema do Binômio, que levou seu nome. A seguir, efetuou cálculos com tangentes (por ele chamado de “fluxões”) que culminou com o surgimento Cálculo Diferencial; muito embora, o cálculo tenha, paralelamente, sido desenvolvido também por Gottfried Wilhelm Leibniz, na Alemanha. Em 1704 publicou “Opticks” que tratava da natureza da luz e dos fenômenos ópticos.

Newton tinha atração muito especial por física experimental, na qual, devido à sua habilidade, construiu telescópios, moinho de vento, entre outros aparatos.

Trabalhou em temas como: mecânica, óptica, astronomia, matemática, alquimia e teologia. Embora seus trabalhos não foram inicialmente publicados, o “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural), ou simplesmente “Principia” somente apareceu em 1687 contendo as Leis da Mecânica Clássica e da Gravitação Universal.

Tais obras são consideradas marcos notáveis e influentes na história da ciência.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir a pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade, continua misterioso diante de meus olhos”.

Sir. Isaac Newton – Trinity College, Cambridge.

Recentemente, a Universidade de Cambridge publicou na internet os trabalhos mais importantes do físico inglês, tais como: os manuscritos originais das famosas leis da mecânica e a versão comentada pelo próprio cientista do Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (<http://cudl.lib.cam.ac.uk/collections/newton/1>).

A mecânica clássica de Newton tem suas limitações, no entanto, com a Lei da Gravitação Universal, Newton mostrou que, as leis que regem o movimento dos corpos na Terra continuam válidas para descrever os corpos celestes, tais como, planetas, estrelas e galáxias do Universo.

1.3 LEI DE NEWTON DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Empregando a 3ª. Lei de Kepler, bem como, as Leis de Newton da mecânica clássica (Lei da Inércia, Princípio Fundamental da Dinâmica e Lei da Ação e Reação) podemos encontrar uma expressão que descreve a força que mantêm os planetas em suas órbitas em torno do Sol.

Consideremos um caso particular do movimento circular de uma massa m , a qual pode representar a massa da Terra, por exemplo, e que orbita uma massa muito maior M , neste caso representando a massa do Sol ($M \gg m$). Sabemos da 3ª. Lei de Kepler que

$$P^2 = kr^3 \quad (1)$$

em que, neste caso, P é o período da órbita, r é a distância do planeta ao Sol e k é uma constante de proporcionalidade.

Escrevendo agora a relação clássica entre a velocidade v do planeta, a distância percorrida em uma volta completa (i.e., um período) $2\pi r$ temos que o período pode ser escrito como:

$$P = \frac{2\pi r}{v} \quad (2)$$

o qual, substituído na Eq. (1) resulta, após o rearranjo dos termos, em:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2 m}{kr^2}. \quad (3)$$

Uma interessante expressão foi obtida. De fato, o lado esquerdo representa a força centrípeta para este movimento circular, ou seja,

$$F = \frac{4\pi^2 m}{kr^2}. \quad (4)$$

Da 3ª. Lei de Newton temos que o módulo da força que M aplica em m é igual ao módulo da força exercida por m em M . Dessa forma, a forma da equação deve ser simétrica com respeito à troca $m \leftrightarrow M$ levando a

$$F = \frac{4\pi^2 M}{k'r^2}, \quad (5)$$

ou seja,

$$F = \frac{4\pi^2 Mm}{k''r^2}. \quad (6)$$

A Eq. (6) acima pode ser obtida pela substituição da relação $k = k''/M$, ou ainda, $k' = k''/m$ na Eq. (4). Introduzindo-se uma nova constante, $G \equiv 4\pi^2/k''$, teremos a Lei de Gravitação Universal, encontrada por Newton,

$$F = G \frac{Mm}{r^2}, \quad (7)$$

onde a constante de gravitação universal no SI é dada por $G = 6,673 \times 10^{-11} N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$.

A Lei de Gravitação Universal permaneceu inquestionável até o início do século XX quando então foi publicada a Relatividade Geral de Albert Einstein em 1915.

2. AS MEDIDAS FÍSICAS EM ESCALA ASTRONÔMICA

Para determinar muitos dos parâmetros básicos de qualquer objeto no céu, tais como, brilho, cor, tamanho, massa, luminosidade, magnitude, etc., é preciso se determinar o quanto este objeto está distante de nós.

Pode ocorrer que a aparência brilhante de uma estrela no céu noturno significa que a mesma está bem perto de nós, ou, em contrapartida, que é na verdade realmente muito brilhante. Analogamente, algumas estrelas podem ter uma luminosidade pequena, por terem realmente este parâmetro baixo, ou no entanto, apresentam-se desse modo por estarem muito distante de nós. Precisamos ser capazes de determinar qual é a fundamentação correta.

Determinar a distância envolvendo corpos celestes sempre foi, e atualmente, por vezes, ainda continua sendo, motivo de dificuldade e erro.

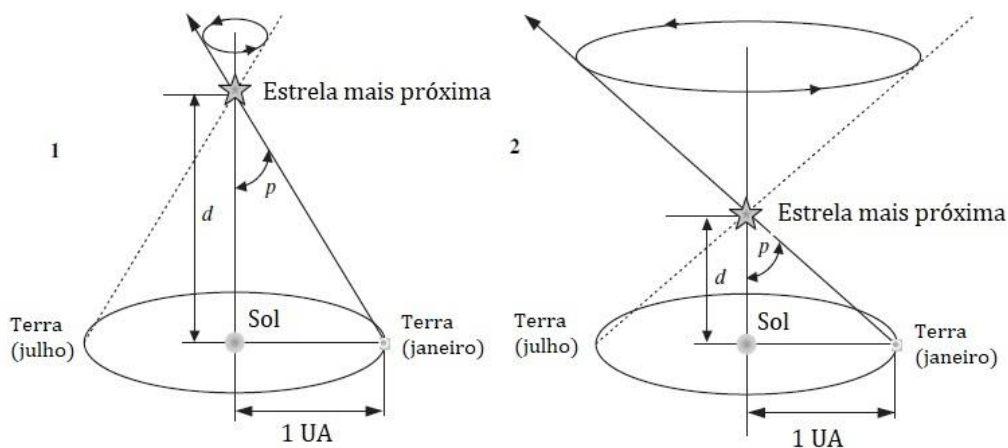
Não existe ainda um consenso sobre qual é o melhor método, pelo menos no que diz respeito para distâncias envolvendo galáxias.

O método mais antigo, e ainda usado hoje, é um dos mais precisos, especialmente no que diz respeito a se determinar as distâncias estelares.

Tal técnica é chamada Paralaxe Estelar (“*Stellar Parallax*”). Ela consiste de uma medida angular quando a estrela é observada a partir de dois locais diferentes da órbita terrestre. Essas duas posições são, geralmente, seis meses de intervalo e, portanto, a estrela parece mudar sua posição em relação às estrelas de fundo mais distantes.

A paralaxe (p) da estrela observada é igual à metade do ângulo através da qual é a posição aparente parece mudar. Quanto maior a paralaxe (p), menor será a distância (d) para a estrela.

Figura 3 – Paralaxe Estelar – Em (1) a Terra orbita o Sol e uma estrela próxima muda sua posição com respeito às estrelas de fundo. A paralaxe (p) de uma estrela é uma medida angular da órbita da Terra como vista a partir de uma estrela. Em (2) temos que, quanto mais próxima a estrela, maior o ângulo de paralaxe (AP).



Fonte: INGLIS, M. “Astrophysics is Easy! An introduction for the amateur astronomer” – Springer (2007) e elaborado pelos autores.

Como podemos observar da figura acima, se uma estrela tiver uma paralaxe medida de $1' = 1/3600^\circ$ e a linha de base é 1 unidade astronômica (UA), que é a distância média entre a Terra e o Sol. Neste caso dizemos que a estrela está a 1 *parsec* (pc).

Dessa forma, 1 *parsec* (pc) corresponde “a distância de um objeto que tem uma paralaxe de 1 segundo de arco”.

A distância d de uma estrela (vide Figura 3) em parsecs é dada pelo inverso de sua paralaxe, i.e.:

$$d = \frac{1}{p} \quad (8)$$

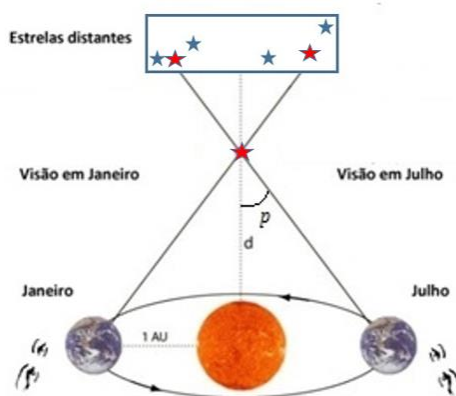
Usando a equação acima podemos verificar que, quando a medida da paralaxe é, por exemplo, de $p = 0,1 \text{ arcseconds}$, temos que a estrela está a uma distância de 10 pc .

Embora a unidade, *parsec*, seja muito usada em astronomia temos a seguinte relação em “anos-luz” (em inglês “*l. y.*”):

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ l. y.} \quad (9)$$

Uma imagem que nos permite visualizar, devido a paralaxe, como a estrela próxima modifica sua posição relativa, com respeito às estrelas distantes de fundo (quando o planeta está diametralmente oposto em seu movimento elíptico em torno do Sol) pode ser encontrada na figura 4.

Figura 4 – Paralaxe Estelar, p – mudança relativa de uma estrela próxima com respeito às estrelas distantes de fundo. Como se pode notar, um mesmo observador, num mesmo local na Terra, porém, em épocas diferentes do ano, vê uma estrela próxima em posições diferentes no céu quando comparadas com as chamadas “estrelas fixas” de fundo (mais distantes).



Fonte: elaborado pelos autores.

É importante esclarecer que todas as estrelas conhecidas têm um ângulo de paralaxe menor que 1 segundo de arco e os ângulos menores que 0,01 arco de segundos são muito difíceis de medir a partir da Terra devido aos efeitos impeditivos produzidos por nossa atmosfera.

Contudo, o satélite Hipparcos, lançado em 1989, era capaz de medir ângulos de paralaxe de até 0,001 segundos de arco, ou seja, possuía um alcance de 1000 pc.

Este avanço, no entanto, somente se aplica para se determinar a distância de estrelas que não estejam tão afastadas de nós.

Mas a maioria das estrelas em nossa galáxia estão muito longe para ser usada esta técnica (medidas de paralaxe) para a determinação de distância.

Um outro método para o cálculo da distância é o da paralaxe espectroscópica.

Nesta técnica é feita uma classificação espectral da estrela que permite uma medida de sua intrínseca luminosidade que pode ser comparada com seu brilho aparente para determinar sua distância.

2.1 BRILHO E LUMINOSIDADE DE UMA ESTRELA

A grande maioria das estrelas e galáxias no céu possuem o mesmo processo de produção de energia do nosso Sol. Isso não significa que elas são semelhantes. As estrelas diferem em tamanho, massa, entre outros aspectos físicos.

Um conceito muito importante é a *luminosidade*, L . Em geral, ela é medida em *watts*, W , ou como um múltiplo da luminosidade do Sol, L_{\odot} .

A luminosidade é a quantidade de energia que a estrela emite a cada segundo. No entanto, não podemos medir a luminosidade de uma estrela diretamente porque tanto o seu brilho, como sua luminosidade depende da distância.

A estrela Alfa Centauri A (*α Centauri A*) e o Sol, por exemplo, possuem luminosidades similares. No entanto, Alfa Centauri no céu à noite aparece como um ponto fraco de luz; isto porque ela está cerca de 280 mil vezes mais longe da Terra que o Sol.

Para se determinar a verdadeira luminosidade de uma estrela precisamos conhecer seu brilho aparente. Ele é definido como a soma da luz que alcança a Terra por unidade de área. Cálculos físicos mostram que a luz que emerge de uma estrela se espalha pelo espaço obedecendo a lei do inverso do quadrado.

Assim, se o nosso Sol fosse visto a uma distância duas vezes maior da Terra ele pareceria mais fraco em sua luminosidade por um fator de 4, i.e., $1/(2^2)$. Se o Sol estivesse na mesma posição de Alfa Centauri, o veríamos mais fraco em luminosidade por um fator de 270 mil.

A quantidade de energia que chega em nossos olhos é o brilho aparente, às vezes chamado de luminosidade de uma estrela ("*star brightness*"). Ela é medida em watts por metro quadrado:

$$b = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (10)$$

onde b é o brilho aparente da estrela em W/m^2 , L é a luminosidade da estrela em W e d é a distância até a estrela em metros, m .

Um exemplo de aplicação da fórmula acima pode ser aplicado para o cálculo do brilho aparente, b , da estrela Sirius cuja luminosidade é $L = 3,86 \times 10^{26}W$. Ela está a uma distância 8,6 anos-luz ($1a.l = 9.46 \times 10^{15}m$). Logo, com os dados acima, temos:

$$b = \frac{3,86 \times 10^{26} W}{4\pi(8,6 \times 9,46 \times 10^{15})^2} = 1 \times 10^{-7} W/m^2. \quad (11)$$

Ou seja, um detector de área $1m^2$ receberá aproximadamente uma fração de 1 por 10 milhões de watts. Os astrônomos medem o brilho de uma estrela com detectores sensíveis à luz trabalhando no campo da fotometria.

Outros cálculos envolvendo luminosidades, distâncias, brilhos e magnitudes de estrelas podem ser encontrados em (INGLIS, 2007).

2.2 COR E TEMPERATURA

Quando olhamos para o céu à noite, vemos muitos pontos cintilantes. Pontos luminosos estáticos podem ser planetas e os cintilantes, em sua grande maioria, são estrelas, e em geral, de cor branca.

Há, no entanto, algumas que exibem cores diferentes – *Betelgeuse*, por exemplo, é vermelha, assim como *Antares*, que está na constelação de Escorpião. Porém, *Capela* é amarela e *Vega*, azul. Observando a olho nu, a maioria de nós não irá notar uma grande variação de cor para as estrelas.

Em contrapartida, observar com o uso de binóculos ou telescópios a situação muda drasticamente. São muitas as variações nas cores e matizes (nuances).

Nossos olhos conseguem detectar a radiação eletromagnética na faixa de comprimento de onda entre o vermelho e a cor violeta, ou seja, entre 700 nm e 400 nm ; intervalo esse em que a luz é visível. O número de ciclos por segundo (a frequência da radiação), portanto, determina a cor.

Os estudos da radiação de corpo negro por Josef Stefan, em 1879, mostraram que a intensidade total emitida, quando o corpo era aquecido, aumentava com a quarta potência da temperatura. Tais pesquisas, conforme veremos a seguir, deram início à teoria quântica (STECHHAHN, 2016).

3. A RELAÇÃO ENTRE MAGNITUDE ABSOLUTA E APARENTE

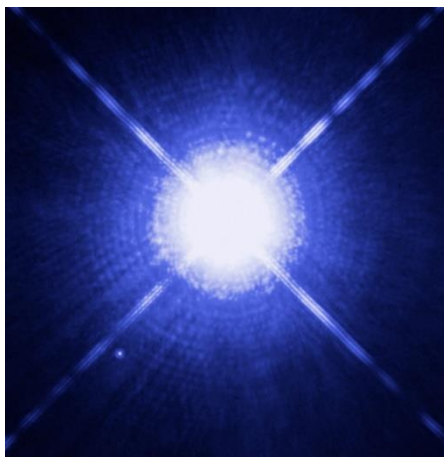
A magnitude aparente, m , e a magnitude absoluta, M , de uma estrela nos permite determinar sua distância. Seja d a distância em *parsec* até a estrela. Assim, temos:

$$m - M = 5 \log d - 5 \quad (12)$$

Podemos, a partir da expressão acima, isolar d e teremos:

$$d = 10^{\left(\frac{m-M+5}{5}\right)} \quad (13)$$

Figura 5 – Estrela Sirius A – Estrela mais brilhante no céu noturno ($m = -1,44$).



Fonte: NASA.

Sendo a magnitude aparente, m , da estrela Sirius de $-1,44$ e a absoluta, M , de $1,46$ podemos concluir, devido à Eq. (13), que a distância da mesma é $d = 2,63$.

Com o uso do Excel podemos montar uma tabela o cálculo da distância para as mais diferentes estrelas.

Tabela 1 – Cálculo da distância de uma dada estrela até o planeta Terra, a partir da magnitude aparente e absoluta da mesma.

<i>Estrela</i>	<i>m</i>	<i>M</i>	<i>distância d (pc)</i>	<i>distância d (anos-luz)</i>
Sirius	-1,44	1,46	2,630	8,574673654
Canopus	-0,72	-2,5	22,699	73,99759417
Alfa Centauro	-0,28	4,3	1,213	3,955647653
Vega	0,03	0,6	7,691	25,07365235
Capella	0,08	0,4	8,630	28,13310066
Sol	-26,72	4,72	0,000005152	8 min

Fonte: elaborado pelos autores.

3.1 A RELAÇÃO ENTRE O BRILHO DAS ESTRELAS E A MAGNITUDE APARENTE

Tanto a magnitude aparente m quanto a magnitude absoluta M são usadas pelos astrônomos em suas mais diferentes formas de relação.

Sejam, a título de exemplo, duas estrelas conhecidas. Tomemos a estrela *Sirius*, a oito anos-luz de nós, e o nosso Sol. Uma vez conhecida as magnitudes aparentes dessas estrelas podemos calcular quantas vezes uma é mais brilhante que a outra.

Chamando de m_1 e b_1 , respectivamente, a magnitude aparente e o brilho da estrela 1 e, analogamente, de m_2 e b_2 a magnitude aparente e o brilho da estrela 2 temos a seguinte relação entre elas:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log\left(\frac{b_1}{b_2}\right) \quad (14)$$

Ou seja, a razão entre seus brilhos b_1/b_2 corresponde, a menos de uma constante, à diferença entre suas magnitudes aparentes.

Tal expressão é muito usada na fotometria moderna.

Particularmente, para o caso da estrela *Sirius* e do Sol temos, respectivamente, que a magnitude aparente da primeira é, conforme vimos, $m_{Sirius} = -1,44$. A magnitude aparente do nosso Sol é $m_{Sol} = -26,8$. Portanto, podemos, a partir da Eq. (14), calcular a relação entre o brilho da estrela *Sirius* e o brilho do Sol, ou seja:

$$m_{Sirius} - m_{Sol} = -2,5 \cdot \log\left(\frac{b_{Sirius}}{b_{Sol}}\right)$$

$$-1,44 - (-26,8) = -2,5 \cdot \log\left(\frac{b_{Sirius}}{b_{Sol}}\right)$$

Dessa forma, isolando a relação b_{Sirius}/b_{Sol} , teremos:

$$\frac{b_{Sirius}}{b_{Sol}} \sim 1/1,38 \times 10^{10}. \quad (15)$$

Assim, a estrela *Sirius A* aparenta ser 13,8 bilhões de vezes mais fraca que o nosso Sol, apesar da mesma ser mais luminosa.

Analogamente, podemos fazer uma tabela, com o uso do Excel, para comparar o brilho de diversas estrelas com o brilho de nosso Sol.

Tabela 2 – Relação entre o brilho de uma estrela com respeito ao brilho do Sol, a partir da magnitude aparente de ambas ($m_{Sol} = m_2 = -26,8$).

Estrela	m_1	$m_1 - m_2$	b_1/b_2
Sirius	-1,44	25,36	1,38
Canopus	-0,72	26,08	2,69
Alfa Centauro	-0,28	26,52	4,07
Vega	0,03	26,83	5,37
Capella	0,08	26,88	5,62

Fonte: elaborado pelos autores.

Para podermos comparar os brilhos intrínsecos de duas estrelas precisamos utilizar uma medida do brilho que independa da distância. A magnitude aparente não nos diz se uma estrela é brilhante porque está perto de nós, ou mesmo, tem fraco brilho porque está distante.

Uma definição mais precisa é a da magnitude absoluta M de uma estrela. Ela é definida como o brilho que um objeto teria uma distância de 10 parsecs do local de observação na Terra.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Medir a distância que nos separa de uma estrela sempre foi uma preocupação para os astrônomos ao longo dos tempos. Por um bom tempo se acreditou que todas as estrelas se encontravam a mesma distância de nós. Ou seja, não havia *paralaxe* (deslocamento aparente de um corpo quando é mudada a posição de observação). Supomos que temos uma estrela relativamente próxima e outras mais afastadas (de fundo ou fixas).

Vimos que, na medida que a Terra gira em torno do Sol, essa estrela próxima muda sua posição relativa às demais de fundo. Assim, a medida da paralaxe, p , nos permite medir a distância de uma estrela. Tal distância será calculada em *parsec* ($\sim 3,3$ anos – luz) que corresponde a um segundo de arco. Alfa centauro é a estrela mais próxima do Sol; está a 4,37 anos-luz de nós (cerca de 1,4 pc). O ângulo da paralaxe trigonométrica, neste caso, é menor que 1 segundo de arco; motivo este que levou aos astrônomos encontrarem muita dificuldade para encontrar a paralaxe, ou seja, a distância das estrelas.

As estrelas possuem propriedades intrínsecas, tais como, temperatura, massa e luminosidade. Elas não dependem do quão estão afastados ou próximos delas. No entanto, o brilho de uma estrela no céu, i.e., seu brilho aparente, não é uma propriedade intrínseca da mesma; ele depende da distância em que a mesma se encontra de nós.

Mostramos a importância da espectroscopia na astrofísica. A maioria das informações que temos sobre estrelas e galáxias são obtidas desse estudo. No entanto, o entendimento completo dessa área exige conhecimento dos fundamentos da teoria quântica.

Com o uso do EXCEL e os conceitos de magnitude aparente, absoluta e brilho, construímos duas tabelas para cinco estrelas (*Sirius, Canopus, Alfa Centauro, Vega e Capella*), bem como o nosso Sol, que mostram a distância de tais estrelas até nós, bem como uma relação entre seus respectivos brilhos numa relação logarítmica dada pela Eq. (14).

Estas medidas e considerações fornecem um passo muito grande para se compreender o mundo em que vivemos.

REFERÊNCIAS

- CARROLL, B. W.; OSTILIE, D. A. An Introduction to modern Astrophysics – 2nd. Edition – PEARSON (2007).
- EISBERG, R. M., LERNER, L. S. Física – Fundamentos e Aplicações, Editora McGraw-Hill (1983).
- GIANCOLI, D. C. Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics - 4nd. Edition – PEARSON (2009).

INGLIS, M. Astrophysics is Easy! An Introduction for the Amateur Astronomer – Springer – (2017).

KARTTUNEM, et. al. Fundamental Astronomy, 5nd. Edition – Springer – (2006).

NETO, G. B. L.; JATENCO-PEREIRA V. Breve História da Astronomia – (2017). Disponível em:

http://www.astro.iag.usp.br/~aga210/pdf_2017a/Introducao_HistoriaAstronomia_2017.pdf

Acesso em: 17 jan. 2018.

STECHHAHN, C. A., et. al. INTRODUÇÃO À MECÂNICA QUÂNTICA NÃO-COMUTATIVA: SITUAÇÃO RELATIVÍSTICA E NÃO-RELATIVÍSTICA. Augusto Guzzo Revista Acadêmica, São Paulo, n. 17, p. 202-218, jul. 2016. ISSN 2316-3852.

Disponível em: <http://www.fics.edu.br/index.php/augusto_guzzo/article/view/332>. Acesso em: 17 fev. 2018. doi: <https://doi.org/10.22287/ag.v1i17.332>.