

SIMULANDO MEDIDAS DE DISTÂNCIAS A ESTRELAS EM LABORATÓRIO

*Roberto dos S. Menezes Jr.*¹
*Nícolas Otávio L. de Oliveira*²
*Crislanda L. Pereira*³

Resumo: Uma das curiosidades mais recorrentes nos estudantes quando se trata de astronomia é entender como se determinam distâncias astronômicas. Isso porque, no cotidiano deles, distâncias são usualmente medidas com instrumentos como réguas, trenas, etc. O método mais comum para medição de distâncias astronômicas é fundamentado na paralaxe, contudo, essa é usada para medir distâncias a estrelas relativamente próximas. Para estrelas mais distantes, um outro método de cálculo de distância consiste em utilizar a medida do fluxo luminoso aparente de um objeto que possui sua luminosidade intrínseca conhecida, denominado vela-padrão. Assim, buscamos, neste trabalho, apresentar os resultados de um experimento realizado em laboratório a respeito desses métodos, utilizando um transferidor (para distância de paralaxe) e a medição do fluxo luminoso de uma lâmpada. Conseguimos assim, medir a distância de paralaxe com um desvio relativo percentual de 0,95%, enquanto a distância luminosidade foi determinada com um desvio relativo percentual de 7,67%.

Palavras-chave: Distâncias; Astrometria; Estrelas; Paralaxe; Fluxo luminoso; Laboratório didático.

SIMULANDO MEDIDAS DE DISTANCIAS A LAS ESTRELLAS EN UN LABORATORIO

Resumen: Una de las curiosidades más recurrentes en los estudiantes cuando se trata de astronomía es entender cómo determinar las distancias astronómicas. Esto porque, en su quehacer cotidiano, las distancias son usualmente medidas con instrumentos como reglas, cintas, etc. El método más común para la medición de distancias astronómicas se basa en la paralaje. Dicho método se utiliza, sin embargo, para medir distancias a las estrellas relativamente cercanas. Para las estrellas más distantes, otro método de cálculo de la distancia consiste en utilizar la medida del flujo luminoso aparente de un objeto que tiene un brillo intrínseco conocido, llamado vela patrón. En este estudio, presentamos los resultados de un experimento realizado en el laboratorio con dichos métodos, usando un transportador (para distancia de paralaje) y la medición del flujo luminoso de una lámpara. Hemos conseguido, de esa manera, medir la distancia de paralaje, con una desviación porcentual de 0,95%, mientras que la distancia de luminosidad se determinó con una desviación porcentual de 7,67%.

Palabras clave: Distancias; Astrometría; Estrellas; Paralaje; Flujo luminoso; Laboratorio didático.

SIMULATING MEASUREMENTS OF DISTANCES TO STARS IN LABORATORY

Abstract: One of the most common curiosities of the students when it comes to astronomy is to understand how astronomical distances are determined. The reason is that in their daily lives, distances are usually measured with instruments such as rulers, tape, etc. The most common method for measuring

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Salvador, Brasil.
E-mail: <rsmjr@ifba.edu.br>.

² Licenciando em Física - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Salvador, Brasil. E-mail: <nicolas.lopes.oliveira@gmail.com>.

³ Licencianda em Física - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Salvador, Brasil. E-mail: <landaquantica@gmail.com>.

astronomical distances is based on parallax, however, the latter is used to measure distances to stars which are relatively close to the earth. For distant stars, another method for calculating distance consists in using the apparent luminous flux of an object that has its intrinsic luminosity known, called the standard candle. In this article, we present the results of a laboratory experiment about those methods, using a protractor (for parallax distance) and the measurement of the luminous flux of a lamp. We were able to measure the parallax distance with a relative percentage deviation of 0.95%, while the luminosity distance was determined with a relative percentage deviation of 7.67%.

Keywords: Distances; Astrometry; Stars; Parallax; Luminous Flux; Didactic laboratory.

1 Introdução

Estudar Astronomia é falar naturalmente sobre Física, Matemática, Química e diversos outros saberes da humanidade. Essa ciência participa intimamente de nossas vidas: a sucessão do tempo, as estações do ano, as fases da Lua, os eclipses são temas relacionados à Astronomia. Seu estudo apresenta características importantes que atuam como fatores de estímulo para o público, uma vez que é próxima de todos os ramos do conhecimento e apresenta questões que normalmente despertam a curiosidade das pessoas, como por exemplo, viagens espaciais, buracos negros e assuntos relacionados à Cosmologia em geral (LANGHI; NARDI, 2012).

Por outro lado, a literatura científica nacional dos últimos anos aponta que os pesquisadores têm discutido a importância da implementação de atividades experimentais como fatores capazes de atenuar as dificuldades existentes no ensino de ciências, atraindo a atenção, contudo, para que estas práticas estejam aliadas a autonomia e criticidade do docente e, possam ser capazes, então, de contemplar um universo mais amplo que aquele delimitado pela educação tradicional (GAMA; HENRIQUE, 2010; LANGHI; NARDI, 2011). Ainda, segundo Alves Filho (ALVES FILHO, 2000), a utilização da atividade experimental por si só não é suficiente, uma vez que o laboratório didático como mero recurso complementar ao conteúdo de ciências tem suas potencialidades restritas em comparação ao seu uso com finalidades próprias e específicas.

Esses dois pontos, o estudo da Astronomia e a atividade experimental, portanto, favorecem, conjuntamente, um ambiente propício e estimulante ao estudante no processo de aprendizagem de Ciências. Assim, no intuito de conciliar esses pontos, desenvolvemos uma atividade experimental partindo de uma questão bastante importante em Astronomia, através do qual desenvolvemos nossa atividade experimental: a determinação da distância a objetos astronômicos observados. Isso porque quando medimos distâncias na Terra, nos deslocamos entre os pontos dos quais queremos determinar a distância com um instrumento de medição (régua, trena,...). Obviamente, a distância a outros astros não pode ser determinada dessa forma. Torna-se necessário, então, a realização de uma transposição didática do conhecimento científico ao conhecimento a ser ensinado em sala de aula (CHEVALLARD, 1991), estando este último, por sua vez, vinculado aos aspectos específicos de cada ambiente escolar e à prática docente.

No caso particular da medição astronômica, devemos utilizar técnicas apropriadas para cada escala de distância. Como ficará claro mais adiante, a depender

da escala de distâncias que estamos trabalhando, uma técnica específica será mais apropriada para medir nossa distância ao objeto observado.

Nesse trabalho, apresentamos a construção de uma simulação de medição de distância a estrelas que possibilita a aplicação em diversos aspectos metodológicos do laboratório didático. Pretendemos descrever um experimento realizado com materiais de fácil aquisição que visou obter a distância de um observador a “estrelas” (representadas por lâmpadas), através de duas técnicas específicas: a distância de paralaxe trigonométrica e a distância luminosidade. Através da primeira, obtivemos a luminosidade absoluta de uma determinada “estrela” e, com a segunda, medimos a distância a uma “estrela” idêntica, porém, mais distante, para a qual a primeira técnica seria ineficaz. Antes de descrevermos, entretanto, o experimento, vamos discorrer na próxima seção sobre algumas técnicas de determinação de distâncias astronômicas e suas escalas de aplicação. Nas seções seguintes descreveremos o procedimento utilizado, os resultados obtidos e as conclusões.

2 Escalas e Distâncias Astronômicas

Diversas são as técnicas de determinação de distâncias em Astronomia, porém essas se aplicam a escalas específicas. Portanto, antes de descrevermos as técnicas, é útil fazer uma breve explanação sobre as unidades e as escalas de distância do Universo. Vejamos.

2.1 Escalas do Universo

As unidades mais comuns para descrevermos as distâncias em Astronomia são o ano-luz (ly), a unidade astronômica (UA) e o parsec (pc).

O ano-luz é a distância que a luz percorre em um ano, ou seja,

$$c \times 365 \text{ (dias)} \times 24 \text{ (h)} \times 3600 \text{ (s)} \approx 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m,}$$

onde $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s, é a velocidade da luz no vácuo. Devemos notar que, apesar do nome, a unidade é derivada do produto da velocidade pelo tempo, que corresponde a uma unidade de distância.

Ela também possui submúltiplos como o minuto-luz, segundo-luz, etc., e pode ser escrita em função de c , como nos casos: 1 minuto-luz = 1 min $\times c$ ou 1 min- c . Essa forma de escrever facilita alguns cálculos, envolvendo distâncias. Por exemplo, sabendo-se que a luz do Sol demora cerca de 8 min para chegar à Terra, qual é a distância Terra-Sol aproximada? Resposta: 8 min $\times c = 8 \times 60 \text{ s} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 1,44 \cdot 10^{11}$ m.

A unidade astronômica é a distância média entre o Sol e a Terra e foi originalmente definida como sendo o raio da órbita circular newtoniana de uma partícula de massa desprezível, livre de perturbações, que se move com uma velocidade angular média de 0,01720209895 radianos por dia (BIMP, 2006). Entretanto, em 2012, a IAU (*International Astronomical Union*) convencionou o valor (IAU, 2012)

$$1 \text{ UA} = 149.597.870.700 \text{ m.}$$

Para efeito de cálculo, costuma-se adotar $1 \text{ UA} \approx 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m} = 150$ milhões de km. A UA costuma ser usada para expressar distâncias dentro do Sistema Solar.

O parsec (pc) é uma unidade bastante utilizada para expressar distâncias em grandes escalas no Universo tais como as escalas cosmológicas. Essa unidade é definida (RYDEN, 2003) como sendo a distância na qual podemos enxergar um objeto de comprimento igual a 1ua, disposto transversalmente à linha de visada, subtendido por um ângulo de $1''$ de arco. Da Figura 1, podemos inferir que $1 \text{ pc} = 1 \text{ UA}/1''$. Como $1 \text{ ua} = 149.597.870.700 \text{ m}$ e $1'' = (1/3600)^\circ \times \pi/180 \text{ rad}$, temos, então que

$$1 \text{ pc} \approx 3,09 \cdot 10^{16} \text{ m}.$$

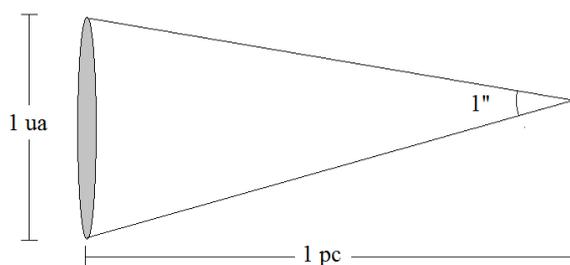


Figura 1 - Diagrama representando a distância de 1 pc, que corresponde à distância de um objeto de 1 UA de comprimento visto dentro de um ângulo de $1''$ de arco.

É muito comum em Cosmologia se utilizar os múltiplos do parsec, que são o kpc e o Mpc. Consideramos escalas cosmológicas aquelas nas quais as distâncias são superiores a 100 Mpc.

Essas três unidades se relacionam tal que

$$1 \text{ pc} \approx 2,06 \cdot 10^5 \text{ UA} \approx 3,26 \text{ ly}.$$

Para termos uma ideia de ordem de grandeza das distâncias dentro do Universo, reproduzimos a seguir algumas dessas escalas (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014):

- $10^7 \text{ m} = 10$ mil km, \approx o diâmetro da Terra (12.700 km);
- $10^9 \text{ m} = 1$ milhão de km, comparável com o diâmetro da órbita da Lua (764.000 km) e com o diâmetro do Sol (1,3 milhões de km);
- $10^{11} \text{ m} = 100$ milhões de km, é quase 1ua (unidade astronômica);
- $10^{13} \text{ m} = 10$ bilhões de km = 70 UA, é, aproximadamente, o diâmetro do sistema planetário do Sol inteiro;
- $10^{15} \text{ m} = 1$ trilhão de km. A nuvem de cometas (Nuvem de Oort), ainda do Sistema Solar, ocupa aproximadamente esta região do espaço;
- $10^{16} \text{ m} = 10$ trilhões de km \sim 1 ano-luz. É o limite do Sistema Solar (Nuvem de Oort). A estrela mais próxima, chamada Próxima Centauri, está a 4 ly do Sol, ainda 3 vezes mais distante;
- $10^{20} \text{ m} \sim 10.000$ ly, é 1/10 do tamanho da nossa galáxia. O Sol está a 30.000 ly do centro da nossa galáxia;
- $10^{21} \text{ m} \sim 100$ mil ly, é o tamanho da nossa galáxia, a Via Láctea.

- 10^{22} m \sim 1 milhão de ly; a galáxia de Andrômeda, a galáxia normal⁴ mais próxima da Via Láctea, está a 2 milhões de anos-luz; o diâmetro do Grupo Local de galáxias, que contém apenas 25 galáxias é de 3 milhões de anos-luz.
- 10^{23} m é o tamanho de um aglomerado de galáxias;
- 10^{24} m é o tamanho de um super aglomerado de galáxias, como o Super aglomerado de Virgem, que inclui o Grupo Local;
- 10^{25} m é a distância dos quasares observados (\approx 4000 Mpc);
- 10^{26} m é a ordem de grandeza do tamanho do nosso Universo observável, pois como ele se formou há 13,8 bilhões de anos atrás (Planck), no Big Bang, então, 13,8 bilhões de anos-luz correspondem a, aproximadamente, 10^{26} m⁵.

2.2 Medidas de distâncias astronômicas

Vamos apresentar agora algumas técnicas de determinação de distâncias.

i) Radar

Ao direcionarmos um pulso de onda eletromagnética no comprimento do rádio (\sim 3 kHz a 300 GHz) a um planeta próximo, a onda viaja durante um tempo τ , entre a emissão e sua recepção após ser refletida pelo planeta. Dessa forma, a distância pode ser determinada por

$$D_R = \frac{c\tau}{2}, \quad (01)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s). Entretanto, a intensidade do sinal recebido decai com a quarta potência da distância. Vejamos isso em um cálculo simplificado.

Seja uma fonte isotrópica (antena) que emite ondas de rádio a uma potência P_e , situada em uma posição $r = 0$. Seja também um objeto, situado em $r = D$, que possui área de seção A (Figura 2). A intensidade do sinal produzido pela antenna a uma distância D é dada pela lei do inverso do quadrado da distância,

$$I(r = D) = \frac{P_e}{4\pi D^2}. \quad (02)$$

⁴ De fato, existem galáxias mais próximas, como as Nuvens de Magalhães, que são pequenas galáxias satélites à Via Láctea e distam cerca de 150 mil anos-luz.

⁵ De fato, uma vez que o Universo se expande, quando a luz dos objetos situados a 13,8 bilhões de anos-luz chega até nós, esses objetos já estarão bem mais distantes (cerca de 46 bilhões de anos-luz).

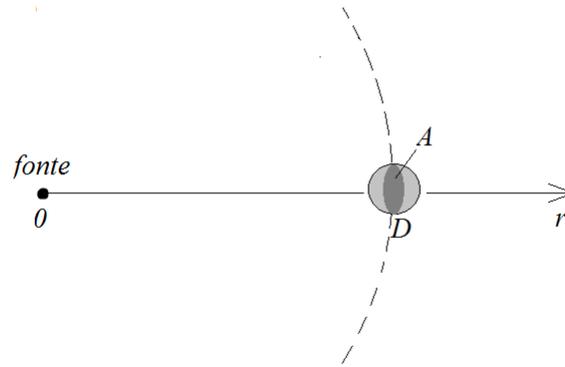


Figura 2 - Fonte emite uma onda de rádio em direção a um objeto situado a uma distância $r = D$ da fonte e que possui uma área seccional A .

Portanto, a potência efetiva recebida pelo objeto é

$$P_r = I(r = D)A = \frac{P_e A}{4\pi D^2}. \quad (03)$$

Supondo que toda a potência recebida é refletida, então, essa mesma potência é reenviada de volta e, novamente, podemos aplicar a equação (02), substituindo apenas P_e por P_r . Assim,

$$I(r = 0) = \frac{P_r}{4\pi D^2} = \frac{P_r P_e A}{(4\pi)^2 D^4}. \quad (04)$$

Portanto,

$$I(r = 0) \propto \frac{1}{D^4}. \quad (05)$$

Dessa forma, se o objeto estiver a uma distância muito grande, a intensidade recebida de volta será muito pequena para ser medida. A equipe do LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) calcula que, por essa técnica, é possível medir distâncias de até $3,00 \cdot 10^{-5}$ pc = 6,18 UA, portanto, dentro do Sistema Solar (LIGO, 2012). Notavelmente, a distância Terra-Sol pode ser medida por essa técnica com precisão de 3 m (ASH et al., 1967).

ii) Paralaxe trigonométrica

A partir de cerca de 10 UA a reflexão de ondas de rádio dificilmente é detectada. Acima dessa escala, portanto, o método utilizado para medir distâncias é o da paralaxe trigonométrica. O movimento da Terra ao redor do Sol faz com que qualquer estrela produza um movimento anual aparente ao redor de uma elipse. Tal movimento pode ser percebido através da observação das estrelas que estão ao fundo no céu – denominadas estrelas fixas. Na antiguidade algumas estrelas eram chamadas de estrelas fixas na esfera celeste, pois suas posições relativas pareciam não variar entre si com o passar do tempo. Tais estrelas diferiam dos planetas principalmente pelo fato de que os planetas pareciam se mover por entre as estrelas fixas (daí o nome planeta: “aquele que

vagueia”). Assim, conhecida a distância média Terra-Sol (R), podemos, através de uma trigonometria simples, obter a distância de paralaxe a uma determinada estrela pela equação⁶

$$D_p = \frac{2R}{\Delta\alpha} \quad (06)$$

onde, $\Delta\alpha$ é o deslocamento angular da estrela visto a partir da Terra, no período em que essa se moveu da posição A à B em sua órbita (Figura 3).

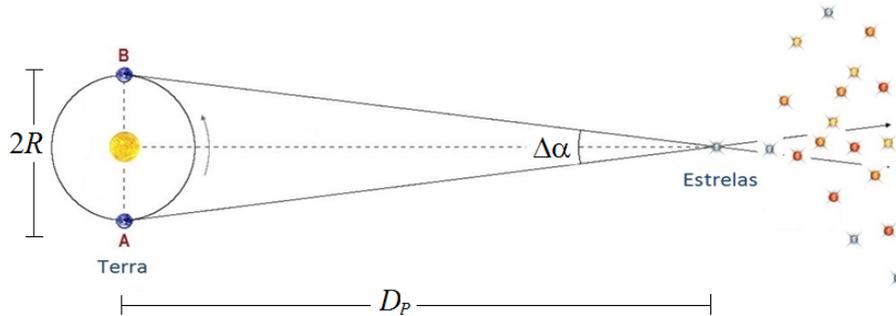


Figura 3 - Estrela observada a partir de dois pontos A e B da Terra.

A atmosfera da Terra torna muito difícil a medição de paralaxes trigonométricas menores que $0,03''$ (segundos de arco) a partir de telescópios situados em sua superfície, de modo que, por muitos anos, este método pôde ser utilizado apenas para encontrar distância de estrelas inferiores a cerca de 60 pc, e nessas distâncias só há algumas poucas estrelas. Entretanto, o satélite HIPPARCOS (ESA, 2007), lançado pela agência espacial europeia em 1989, foi capaz de encontrar distâncias de paralaxe para cerca de 10^5 estrelas, com precisão da ordem de 1 miliarco-segundo (~ 2 kpc). O satélite espacial GAIA (*Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*), em operação desde 2013, pretende medir durante seu período de operação, a posição de cerca de 1 bilhão de estrelas com uma precisão de até 20 micro arco-segundos (cerca de 100 kpc) (ESA, 2012).

No entanto, a medição de $\Delta\alpha$ para objetos com distâncias de ordens superiores a essas, por essa técnica, exige uma precisão que a tecnologia atual não nos oferece.

iii) Luminosidade

Dizemos que os objetos se encontram em escalas cosmológicas quando a distância entre eles é da ordem de 100 Mpc. Usando a órbita da Terra como linha de base e a técnica da paralaxe, isso corresponde a uma precisão menor que 20 nano arco-segundos, o que é tecnicamente impossível por esse meio. Um método muito comum para se determinar distâncias nessas escalas é baseado na medição do fluxo de energia de objetos de luminosidade absoluta L_0 conhecida (denominados de velas-padrão). A

⁶ A relação deveria ser $D_p = \frac{R}{\text{tg}\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)}$, mas, uma vez que os ângulos de paralaxe medidos são muito pequenos, podemos fazer a aproximação $\text{tg}\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right) \approx \frac{\Delta\alpha}{2}$, de onde resulta a equação (06).

luminosidade absoluta é a energia por ele irradiada por unidade de tempo. Dessa forma, o fluxo (energia por segundo por unidade de área) medido por um receptor, situado a uma distância r da fonte de emissão, será dado por

$$\phi(r) = \frac{L_0}{4\pi r^2}, \quad (07)$$

supondo que a fonte emita a radiação isotropicamente. Assim, se conhecemos de alguma maneira, a luminosidade L_0 de um objeto, então nós podemos medir o fluxo ϕ e definir a distância luminosidade⁷

$$D_L = \sqrt{\frac{L_0}{4\pi\phi}}. \quad (08)$$

A questão agora consiste em encontrar objetos cuja luminosidade absoluta seja conhecida. Nos remeteremos agora a apenas um tipo de vela-padrão: as estrelas variáveis cefeidas.

O nome cefeida é originado da estrela δ -Cephei que se encontra a uma distância de cerca de 300 pc de nós. Essas estrelas são altamente luminosas e são pulsantes, o que acarreta em uma variação de sua luminosidade com períodos que variam entre 1,5 e 60 dias ou até superiores a 100 dias. Em 1912, Henrietta S. Leavitt, do Harvard College Observatory, descobriu que as variáveis cefeidas na Pequena Nuvem de Magalhães (PNM) tinham luminosidades aparentes (fluxos) dadas em função do período de variação de sua luminosidade. Como a distância à PNM era conhecida por paralaxe, medindo-se as luminosidades aparentes para diversas cefeidas foi possível, então, calibrar a relação entre o período e a luminosidade absoluta, tornando-as velas-padrão que poderiam ser usadas para se medir a distância às galáxias nas quais se encontram. Mais tarde, o astrônomo americano Edwin Hubble utilizou essa relação para medir distâncias a nebulosas, concluindo que essas eram na verdade galáxias. Além disso, ele ainda pôde verificar pela primeira vez a expansão do Universo (WAGA, 2005), deduzindo, a partir dos dados observacionais a relação entre a velocidade de afastamento da galáxia (v) e sua distância (d), que hoje se conhece por lei de Hubble,

$$v = H_0 d \quad (09)$$

onde $H_0 = 67,4 \text{ km/s.Mpc}^8$, determinado pela sonda espacial PLANCK(ADE et al., 2014).

Por se tratarem de estrelas, a luminosidade de variáveis cefeidas pode não ser percebida para distâncias muito grandes. Nesses casos, usamos supernovas como velas-padrão. As supernovas são explosões de estrelas no final de sua vida e, particularmente, as classificadas como Ia, resultantes de um sistema binário de estrelas e que não possuem linha de hidrogênio em seu espectro, têm sua curva de luminosidade calibrável.

⁷ De fato, essa seria a distância ao objeto se o Universo fosse plano e estático. Existem fortes evidências de sua planura, porém sabemos que ele se expande. Entretanto, para distâncias em torno de 100 Mpc, a utilização da equação (08) pode ser justificada, pois o erro que se comete ao usá-la nessa escala, é em torno de 5%. A demonstração desse fato, contudo, está fora do escopo desse trabalho.

⁸ Hubble obteve o valor de $H_0 = 500 \text{ km/s.Mpc}$.

3 Simulação de medidas de distâncias a estrelas em um laboratório – procedimento experimental.

O experimento consiste em, primeiramente, determinarmos a distância a uma estrela relativamente próxima através da paralaxe e medirmos seu fluxo luminoso. Dessa forma, via equação (07), determinamos sua luminosidade absoluta L_0 . Em seguida, conhecido L_0 , podemos, medindo o fluxo de uma estrela, suposta idêntica, posicionada mais distante, determinarmos a sua distância a nós pela equação (08).

A fim de simular as estrelas a serem observadas, utilizamos duas lâmpadas de filamento de tungstênio idênticas (lâmpadas de lanterna automotiva). Essas serão tratadas como estrelas de mesma luminosidade absoluta L_0 . Além das lâmpadas, utilizamos ainda uma trena (ou fita métrica), uma régua de madeira de 1,000 m, um transferidor (escala de 0° a 180°), uma tira de cartolina e duas tachinhas. Para medir o fluxo luminoso, utilizamos um luxímetro digital (também pode ser usado um aplicativo de smartphone). Utilizamos ainda alguns suportes para fixação da lâmpada e do sensor do luxímetro. O material está apresentado na Figura 4.

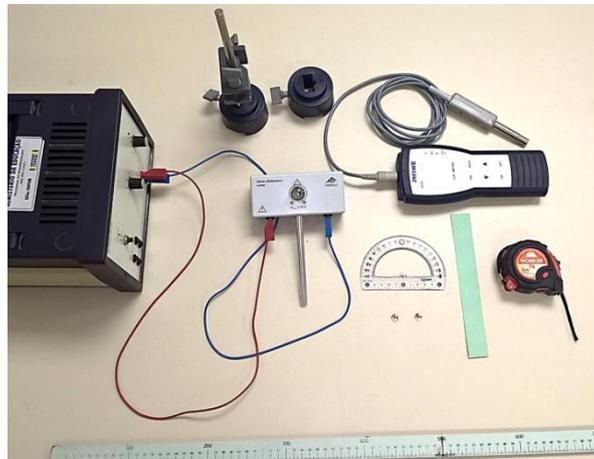


Figura 4 - Materiais utilizados no experimento.

O transferidor com as tachinhas foi utilizado para medir o deslocamento angular das posições das lâmpadas quando visto por dois pontos distintos. A ideia é buscar alinhar as pontas das tachinhas com o centro do filamento da lâmpada, de modo a reduzir o efeito da paralaxe na própria medida, como veremos na próxima seção.

a. Construção do “telescópio”

Para a construção do “telescópio” com o qual medimos a paralaxe, fizemos, com uma das tachinhas, um furo na tira de cartolina e, em seguida, um outro no centro do transferidor (local onde posicionamos o vértice do ângulo que queremos medir), de baixo para cima, a fim da ponta ficar na direção “para cima” em relação à mesa. Furamos novamente a cartolina com uma outra tachinha, de modo a essa tangenciar o transferidor na posição de sua graduação. A Figura 5 mostra o “telescópio” montado. Após essa montagem, posicionamos o lado plano do transferidor de modo a deslizar sobre a régua, disposta transversalmente à direção que queríamos medir a distância (Figura 5 - direita). Essa configuração possibilita medir a posição angular de um objeto,

deslizando o transferidor sobre a régua e alinhando as tachinhas com o referido objeto. Em nosso experimento adotamos a distância percorrida com o transferidor como sendo $2R = 0,200$ m. Essa distância reproduz o diâmetro médio da órbita da Terra, ou seja, a distância AB na Figura 3.

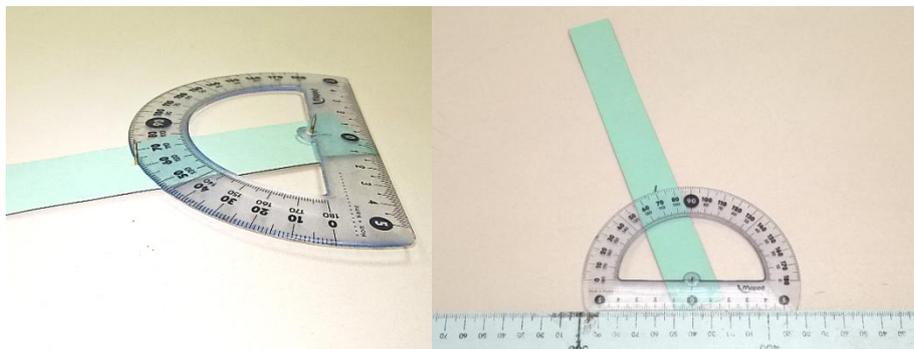


Figura 5 - Transferidor montado como telescópio.

Construído o “telescópio”, passemos para a próxima etapa que é a calibração do luxímetro como régua.

b. Calibração do luxímetro

Nas equações (07) e (08), assumimos que a fonte emite radiação isotropicamente, perfeitamente. No entanto, a lâmpada que utilizamos como fonte luminosa é uma lâmpada de filamento de tungstênio, sendo assim, sua emissão não é perfeitamente isotrópica. Necessitamos, portanto, encontrar a forma funcional $\phi(r)$. Para tanto, posicionamos o luxímetro em frente à lâmpada (com tensão fixada em 10 V^9) e medimos, para diferentes distâncias (r), o fluxo (ϕ) registrado no luxímetro. O procedimento de medição e a curva de calibração podem ser observados na Figura 6. A função forneceu

$$\phi(r) \propto r^{-1,702}. \quad (10)$$

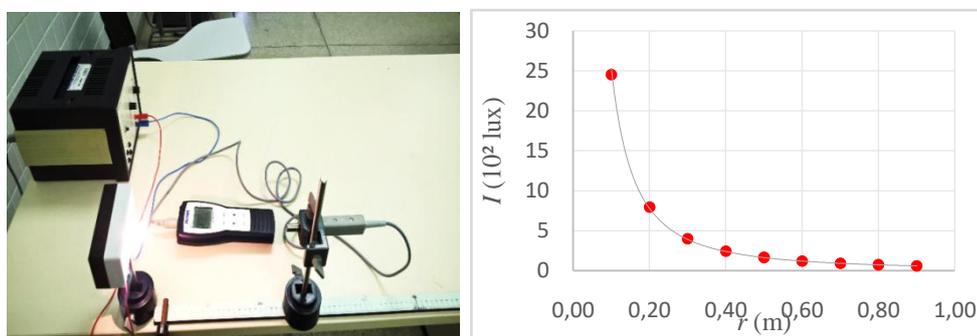


Figura 6 - Esquerda: procedimento experimental para a obtenção da função $\phi(r)$. Direita: gráfico do fluxo luminoso emitido pela lâmpada de filamento de tungstênio versus a distância à mesma. Essa medição foi realizada com a lâmpada como única fonte luminosa presente (sala em escuridão total).

⁹ No experimento mantivemos todo o tempo essa tensão na lâmpada. Esse fato é essencial para obtermos bons resultados.

Como dito, para uma emissão perfeitamente isotrópica, a lei de potência esperada seria $\phi(r) \propto r^{-2}$, por isso a necessidade da calibração.

A partir da curva de ajuste da Figura 6, é possível também encontrar a luminosidade absoluta, porém, preferimos omitir essa informação aqui, uma vez que determinaremos esse valor indiretamente, via paralaxe.

c. Determinação da distância à estrela próxima, via paralaxe¹⁰

Para medirmos a distância à “estrela” próxima (D_p), utilizamos a equação (06), onde fizemos $2R = 0,200$ m. Assim, necessitamos medir, para o deslocamento $2R$, a variação angular $\Delta\alpha$, sobrepondo visualmente as pontas das tachinhas sobre a “estrela” (filamento da lâmpada). A Figura 7 mostra a montagem para essa medição.

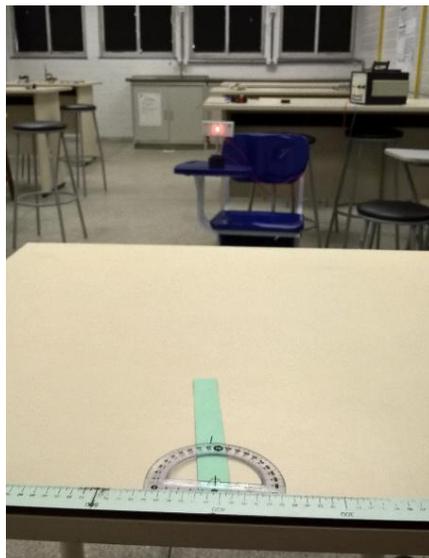


Figura 7 - Medição da paralaxe.

Concomitantemente com a medição de $\Delta\alpha$, medimos também o fluxo luminoso ϕ_0 chegado ao luxímetro, posicionado onde se encontrava antes o transferidor. Com esses valores, via equações (06) e (10), é possível determinar a luminosidade absoluta L_0 para a escuridão e claridade. Os resultados serão apresentados na próxima seção.

4 Resultados

Apresentamos agora os resultados da atividade experimental realizada, bem como alguns comentários pertinentes.

¹⁰ De fato, tais medidas são realizadas pelos astrônomos superpondo imagens de um mesmo objeto, obtidas por telescópios, em diferentes instantes, através das quais mede-se a mudança aparente de posição do referido astro. Entretanto, o princípio matemático que permite tal medição é o mesmo do descrito nessa seção.

a. Medição da distância via paralaxe

Para efetuar a medição da distância pela paralaxe, fixamos a lâmpada a uma distância de $2,10 \pm 0,01 \text{ m}^{11}$ e variamos a posição do transferidor ao longo da régua (conforme visto na Figura 7) de 0,200 m. Procedendo dessa forma, obtivemos uma variação angular aparente

$$\Delta\alpha = 5,5^\circ \pm 0,5^\circ = 0,096 \pm 0,009 \text{ rad},$$

que nos forneceu o valor de distância

$$D_p = 2,08 \pm 0,19 \text{ m}.$$

Esse valor corresponde a um desvio relativo percentual de apenas 0,95% do valor previamente fixado (sem levarmos em conta o erro cometido).

b. Determinação da luminosidade absoluta L_0

Determinada a distância, posicionamos o luxímetro onde antes estava o transferidor e medimos o fluxo luminoso (Figura 8), obtendo um valor de

$$\phi(r = D_p) = \phi_0 = 14,0 \pm 0,1 \text{ lux}.$$

Com esse valor, o resultado da subseção anterior e utilizando a função obtida na calibração,

$$\phi(r) = \frac{L_0}{r^{1,70}}, \quad (11)$$

foi possível obter a luminosidade absoluta

$$L_0 = 48,7 \pm 4,7 \text{ lux} \cdot \text{m}^{1,70}.$$



Figura 8 - Medição do fluxo luminoso para uma distância de 2,10 m.

¹¹ Apesar de a trena utilizada nessa medição ser milimetrada, estimamos o erro nessa medida na ordem de 0,01 m (1 cm) devido à imprecisão da localização do filamento e também a ondulações na trena quando esticada.

c. Medida da distância a uma estrela distante

Uma vez obtida a função $\phi(r)$, o luxímetro foi transformado em uma régua, de modo que, uma vez medido o fluxo luminoso, podemos determinar a distância da fonte invertendo a equação (11):

$$r(\text{m}) = \sqrt[1,70]{\frac{48,7}{\phi(\text{lux})}} \quad (12)$$

Na sequência, posicionamos a “estrela” a uma distância igual a 3,00 m e efetuamos a medição do fluxo luminoso, obtendo o valor $\phi = 8,6$ lux. Com esse valor, utilizando a equação (12), obtivemos a distância

$$r = 2,77 \pm 0,16 \text{ m,}$$

que corresponde a um desvio relativo percentual de 7,67% do valor previamente fixado (sem levarmos em conta o erro cometido).

Para distâncias maiores que 3,00 m o método se mostrou ineficaz. Acreditamos que a razão disso seja a múltipla reflexão da luz nos objetos presentes na sala, aumentando o fluxo indireto chegado ao medidor e, portanto, interferindo na medição direta da luz proveniente da lâmpada. Em um teste anterior, efetuamos a calibração e as medições à luz artificial mais ambiente e conseguimos obter um bom resultado para distâncias de até 6,00 m. Nesse caso, obtivemos os resultados apresentados na Tabela 1 abaixo. Optamos, entretanto, pelo método com a sala escura devido à variação da luminosidade ambiente durante o procedimento de medição (nuvem tampando o Sol, por exemplo).

Função de calibração	Fluxo medido (lux)	Distância fixada aleatoriamente (m)	Distância determinada pelo fluxo (m)	Desvio relativo percentual (%)
$\phi(r) = 40,05/r^{1,66}$ (lux)	$2,3 \pm 0,1$	$5,76 \pm 0,01$	$5,58 \pm 0,40$	3,10

Tabela 1 - Resultados obtidos para calibração e medição de distância para a sala com luzes acesas mais iluminação externa.

5 Conclusões

A busca por uma metodologia de ensino que melhore a compreensão dos estudantes dos conceitos teóricos apresentados em aula constitui papel inerente da atividade docente, mas não por isso deixa de ser, muitas vezes, um desafio. Nesse âmbito, a atividade experimental desempenha um papel fundamental, uma vez que envolve o estudante como coautor do seu processo de aprendizagem, além de aguçar o seu interesse no que está sendo exposto. Compreendemos também que no ensino de conceitos relacionados à Astronomia, a experimentação deve desempenhar o seu papel, apesar de, muitas vezes, um simples telescópio ser de difícil acesso a muitos

professores. Com a finalidade de introduzir a experimentação nessas aulas, desenvolvemos um procedimento que visa determinar distâncias a “estrelas” em uma sala de aula, utilizando, para tanto, materiais de fácil aquisição, tais como régua, trena, cartolina, transferidor, lâmpada, luxímetro e tachinhas, através dos quais é possível determinar a paralaxe trigonométrica e medir o fluxo luminoso proveniente da “estrela”, a fim de estimar sua distância. Desses materiais, o de mais difícil aquisição é o luxímetro digital, mas que pode ser encontrado com valores a partir de R\$ 100,00 (cem reais) ou substituídos por um aplicativo de smartphone (existem muitos disponíveis nas lojas virtuais), porém, nesse último caso, os resultados podem não ser tão bons como os apresentados aqui.

Ao realizarmos o experimento, medimos diretamente a distância com uma trena e utilizamos os métodos citados, obtendo bons resultados. No caso da paralaxe, obtivemos, para uma distância fixada de 2,10 m, uma medição de distância via paralaxe igual a $2,08 \pm 0,19$ m, o que corresponde a um desvio percentual de apenas 0,95%. No caso da distância luminosidade, obtivemos uma medição, via distância luminosidade, de $2,77 \pm 0,16$ m, para uma fixada igual a 3,00 m, com a sala totalmente escura, e $5,58 \pm 0,40$ m, para uma distância aleatoriamente fixada de 5,76 m, com a sala clara (luz artificial mais ambiente). Observamos que com a sala clara o resultado foi melhor, bem como foi maior a distância possível de ser medida. Acreditamos que a razão disso reside nas múltiplas reflexões nos objetos da sala, quando escura, que contribuem para uma incidência indireta no luxímetro. Esse efeito é minimizado quando a sala está clara, uma vez que essas reflexões são ofuscadas pela luz ambiente, mais ou menos constante, possibilitando medições de distâncias maiores.

Esta atividade oferece ao docente ampla possibilidade de aplicação metodológica, desde aquelas mais convencionais, características do laboratório tradicional, àquelas de prática investigativa. Por fim, acreditamos que essa prática possa auxiliar os professores a despertar ainda mais o interesse dos estudantes pela Astronomia, contribuindo para o aprendizado desses, bem como para a popularização da ciência como um todo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PIBID/Capes/IFBA pelo apoio financeiro.

Referências

ADE, P. A. R. et al. Planck 2013 Results. XVI. Cosmological Parameters. **Astronomy & Astrophysics**, v.571, p.a16, 2014.

ALVES FILHO, J. P. Regras da Transposição Didática Aplicadas ao Laboratório Didático, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.17, n.2, p.174-188, 2000.

ASH, M. E.; SHAPIRO, I. I.; SMITH, W. B. Astronomical constants and planetary ephemerides deduced from radar and optical observations. **Astronomical Journal**, v.72, n.3, p.338-50, 1967.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDSET MESURES (BIPM). **The International System of Units (SI)**. 8. ed. 2006.

CHEVALLARD, Y. **La Transposition Didactique: du savoir savant au savoir enseigné**. La Pensee Sauvage Éditions. Grenoble. 1991.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Gaia**. 2012. Disponível em: <<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>>. Acessado em: 04 de março de 2017.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **The Hipparcos Space Astrometry Mission**. 2007. Disponível em: <<https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos>>. Acessado em: 04 de março de 2017.

GAMA, L.; HENRIQUE, A. B. Astronomia na sala aula: por quê?. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n.9, p.7-15, 2010. Disponível em: <www.relea.ufscar.br/index.php/relea/article/view/146>. Acessado em: 01 de junho de 2017.

INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION (IAU). **Resolution B2: on the re-definition of the astronomical unit of length**, 2012. Disponível em: <<https://www.iau.org/public/themes/measuring/>>. Acessado em: 04 de março de 2017.

LANGHI, R. Interpretando reflexões de futuros professores de física sobre sua prática profissional durante a formação inicial: a busca pela construção da autonomia docente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.16, n.3, p.403-424, 2011.

LANGHI, R; NARDI, R. **Educação em astronomia: repensando a formação de professores**. São Paulo: Escrituras, 2012.

LASER INTERFEROMETER GRAVITATIONAL WAVE OBSERVATORY (LIGO). **Methods of Measuring Astronomical Distances**. 2012.

OLIVEIRA FILHO, K.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

RYDEN, B. **Introduction to Cosmology**. Athens: Addison Wesley, 2003.

WAGA, I. 100 years of cosmology and new challenges for the 21st century. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n.1, p.157-173, 2005.