

NASCIMENTO E MORTE DE UMA ESTRELA EM UMA ABORDAGEM SIMPLES PARA O ENSINO MÉDIO: A EVOLUÇÃO ESTELAR
BIRTH AND DEATH OF A STAR IN A SIMPLE APPROACH TO HIGH SCHOOL: THE STELLAR EVOLUTION

Santiago Maia Gil¹, Janildes Silva Pinho² e Iranderly Fernandes de Fernandes³

¹*Instituto Federal da Bahia (IFBA) – Campus Euclides da Cunha, e-mail: santiago.maia@ifba.edu.br.*

²*Colégio Estadual José Ferreira Pinto – Feira de Santana, e-mail: janesbio@gmail.com.*

³*Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Departamento de Física (DFIS), Observatório Astronômico Antares, Mestrado profissional em Astronomia (MPAstro), Feira de Santana-BA, Brasil, e-mail: ifferrandes@uefs.br.*

A curiosidade em compreender o céu sempre esteve presente na história da humanidade. O universo é fascinante e cheio de luz, oriunda de corpos que intrigam, até os dias atuais, os cientistas de diversas áreas do conhecimento, as estrelas. O nascimento, evolução e morte desses corpos celestes mostram, ao contrário do que se pensava, que o céu não é estático e eterno, pelo contrário, a sua dinâmica mostra transformações e fenômenos astronômicos. Levar esse conteúdo para sala de aula é, além de constar nos documentos norteadores da educação básica, importante para dar significado a aprendizagem de temas da física, química e matemática, além da concepção do nosso lugar no espaço e tempo no universo. Este artigo tem como objetivo mostrar ao professor como esse assunto pode ser abordado em sala de aula, sugerindo, também, alguns experimentos de baixo custo e fácil construção.

Palavras-chave: Ensino de Física, Evolução estelar, espectroscopia, paralaxe.

The curiosity to understand the sky has always been present in human history. The universe is fascinating and full of light, coming from bodies that intrigue, until today, scientists from different areas of knowledge, the stars. The birth, evolution and death of these celestial bodies show, contrary to what was thought, that the sky is not static and eternal, on the contrary, its dynamics show transformations and astronomical phenomena. Taking this content to the classroom is, in addition to appearing in the guiding documents of basic education, important to give meaning to the learning of topics in physics, chemistry and mathematics, in addition to the conception of our place in space and time in the universe. This article aims to show the teacher how this subject can be approached in the classroom, also suggesting some low-cost and easy-to-construct experiments.

Keywords: Teaching Physics, Stellar evolution, spectroscopy, parallax.

INTRODUÇÃO

Contemplar o céu culminou na curiosidade de compreender os fenômenos por trás daqueles pontinhos brilhantes que vemos em uma noite escura e limpa, as estrelas. Para isso acontecer, levou muito tempo e foi necessário romper as barreiras impostas pelas crenças e religiões que colocavam a raça humana com o protagonismo de todo o universo. As estrelas estão aqui bem antes de nós surgirmos na Terra, observá-las e compreendê-las é fundamental para traçar a história do próprio universo e, também, o seu futuro.

As condições iniciais de um meio do espaço propício aos surgimentos de estrelas, ou seja, os berçários estelares¹, irão conduzir aos surgimentos desses corpos, além de definir suas propriedades como massa, densidade e temperatura. A partir disso, é possível observar estrelas de vários tamanhos, intensidade de brilhos e cores. Essa diversidade indica que as estrelas podem surgir e evoluir de diferentes formas entre si.

O colapso gravitacional de uma nuvem de gás e poeira altera a densidade do meio, causando o aquecimento da matéria, que por sua vez vai provocar a emissão de radiação do objeto. Nesta fase, esse objeto é conhecido como uma protoestrela [1]. A partir disso, é questão de tempo para iniciar as reações nucleares e se tornar uma estrela de sequência principal, ou seja, entrar no equilíbrio hidrostático. Dessa maneira, dentro desses corpos existe uma luta entre pressão e força gravitacional que pode levar pouco ou muito tempo, mas terá fim quando o desequilíbrio surgir e isso pode ser tão

¹ Os berçários estelares são as nuvens de gás e poeira.

trágico quanto espetacular. Esse tipo de assunto deve ser abordado nas salas de aulas, pois descrevem como todas as estrelas são, principalmente o Sol, a estrela mais próxima da Terra, além disso, podemos compreender qual o futuro desses astros.

Os documentos norteadores da educação brasileira já apontam para a inclusão de temas relacionados com a evolução estelar no ensino básico. A BNCC [2], para o ensino de ciências do nono ano, traz na unidade temática Terra e Universo, o objeto de conhecimento Evolução Estelar, mas é claro que essa abordagem deve ser de forma introdutória e simplificada. Entretanto, como o ensino médio é o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no fundamental, esse tema é destacado na competência específica 2 da área Ciências da Natureza e suas Tecnologias, cuja habilidade esperada que os estudantes tenham após passar pelo processo de ensino e aprendizagem desse assunto será a habilidade de código EM13CNT209, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Competência e habilidade que vincula o tema deste artigo com a BNCC

CIÊNCIAS DA NATUREZA E SUAS TECNOLOGIAS NO ENSINO MÉDIO COMPETÊNCIA ESPECÍFICA 2
Analisar e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, e fundamentar e defender decisões éticas e responsáveis.
HABILIDADE EM13CNT209
Analisar a evolução estelar associando-a aos modelos de origem e distribuição dos elementos químicos no Universo, compreendendo suas relações com as condições necessárias ao surgimento de sistemas solares e planetários, suas estruturas e composições e as possibilidades de existência de vida, utilizando representações e simulações, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como softwares de simulação e de realidade virtual, entre outros).

Dessa maneira, fica exposto a importância de levar esse conteúdo para dentro da sala de aula. Contudo, os princípios físicos e teorias que envolvem a temática transcendem uma única habilidade da BNCC, mas permeiam diversos temas como reações nucleares, propagação de calor, eletromagnetismo, gravitação, fluidos, teoria cinética dos gases, dentre outros que vão auxiliar ao professor conectar os diversos ramos da física em um fenômeno da natureza interessante: o nascimento e morte² de uma estrela.

² “nascimento e morte” é uma expressão coloquial – não há intenção de dar sentido biológico ao fenômeno, mas sim o surgimento, evolução e fim dos corpos celestes chamados de estrelas.

Embora estudar a evolução estelar signifique trabalhar diversos conteúdos na sala de aula, o tema é tratado de forma rápida e pouco correlacionada nos livros didáticos. Existe um atraso secular entre o desenvolvimento real das disciplinas, sua transposição didática e sua utilização efetiva nas escolas contemporâneas [3]. Além disso, embora incluso na BNCC e, também, nos livros didáticos, muitas vezes são ignorados pelos professores, pela sua formação ou indisponibilidade de material adequado [3].

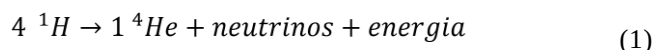
O objetivo principal deste trabalho é mostrar, por meio de teoria e experimentos, como a evolução estelar pode ser trabalhada no ensino médio de forma simples e correlacionada com outros temas da física, sem perder o rigor científico, tornando o processo de ensino e aprendizagem mais efetivo e significativo.

NASCIMENTO DAS ESTRELAS

Você já imaginou de onde vem o hélio, carbono, oxigênio, silício ou até mesmo o ferro? Muitos desses e outros elementos conhecidos são produzidos no interior das estrelas e compreender isso é importante para esclarecer a evolução do universo e até mesmo como a vida se formou na Terra. Dessa maneira, as estrelas são as usinas nucleares que sintetizam e espalham vários elementos químicos pelo universo.

Tudo começa com uma nuvem de poeira e gás que permeia o meio interestelar³. Caso haja alguma perturbação nesse meio, então, ocorrerá um desequilíbrio gravitacional, com isso, a densidade e a temperatura irão aumentar e a partir desse colapso, surge, então, uma protoestrela.

A captura de massa pela protoestrela faz a força gravitacional aumentar cada vez mais e se for suficientemente grande, então, haverá a fusão dos átomos de hidrogênio em Hélio, em seu núcleo. Nesse momento a pressão térmica e radiativa irá balancear contra a força da gravidade, ocorrendo o equilíbrio hidrostático, dando início a fase mais duradoura desses corpos chamados, a partir desse momento, de estrelas. Essa fusão termonuclear pode ocorrer por diversos processos, então, vamos analisar o mais comum em estrelas de massas medianas, como o Sol, conhecido como cadeia próton-próton, ou simplesmente cadeia PP. Basicamente o que ocorre é o envolvimento de quatro prótons de hidrogênio para formar um elemento de hélio, podendo ser resumido da seguinte maneira:



A massa de antes e depois da reação difere em 0,7% [4], ou seja, essa parcela foi convertida em energia conforme a equação de Albert Einstein:

$$E = m \cdot c^2 \quad (2)$$

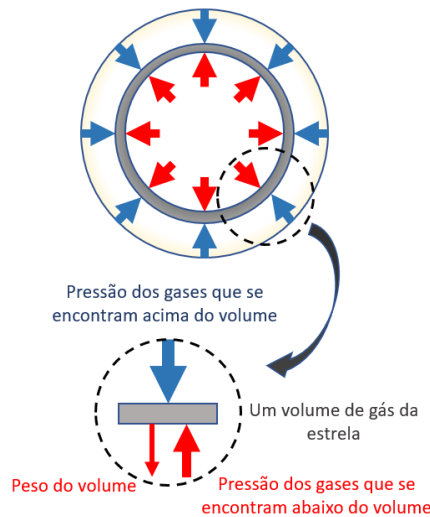
Onde **E** é a energia, **m** a massa e **c** a velocidade da luz no vácuo. Embora a massa perdida seja muito pequena é possível perceber que a energia resultante da transformação será esse valor pelo produto da velocidade da luz ao quadrado, resultando em grande quantidade de energia liberada pela reação.

EQUILÍBRIO HIDROSTÁTICO

³ O meio interestelar refere-se ao material que preenche o espaço entre as estrelas e sua composição é, principalmente, de hidrogênio, em torno de 90%. [4].

Fazendo uma comparação com a estrela mais próxima da Terra, o Sol, que possui a fusão termonuclear devido a sua força gravitacional que é apontada para o seu centro, mas como isso não o faz implodir? Isso acontece pelo fato de existir uma força resultante contrária à gravidade: a força de pressão do gás; composta pela pressão térmica e radiativa em seu interior. A Figura 1 mostra a representação do equilíbrio hidrostático de uma estrela e isso é fundamental para compreender como é possível um corpo com tanta massa, não colapsar devido a sua própria gravidade.

Figura 1 - Representação do equilíbrio hidrostático de uma estrela.



Podemos representar o Sol, assim como todas as estrelas, em fase de equilíbrio, como uma esfera auto-gravitante, assim podemos descrever a equação de equilíbrio, obtido a partir de um elemento de volume infinitesimal da esfera, resulta na seguinte expressão:

$$F_{Grav} = F_{Pressão} \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r^2} \quad (4)$$

Onde G é a constante gravitacional, ρ a densidade, r a distância do centro até o pedaço de volume, dr e dP o acréscimo infinitesimal do raio e pressão, respectivamente, e M_r a massa contida até a distância r .

O cabo de guerra que ocorre dentro de uma estrela não é equilibrado ao longo do tempo e isso marca as diferentes fases de sua evolução, até chegar ao momento que isso se rompe e, portanto, chega a sua morte. Mas, todas as estrelas possuem o mesmo fim? Se a sua origem depende da massa disponível dentro de uma nuvem de gás e poeira, além de sua composição química, então, cada estrela pode ter propriedades particulares, como temperatura superficial, cor e intensidade de brilho. Portanto, sua evolução e fim poderá tomar rumos diferentes de outras estrelas com propriedades muito diferentes. Essas questões serão tratadas nas próximas seções.

COR DE UMA ESTRELA

Imagine uma barra de aço sendo aquecida, com o aumento da temperatura ela irá emitir radiação térmica, infravermelha, mas se isso continuar, chegará um momento que ela começará a emitir luz visível ao rubro, e, caso o objeto

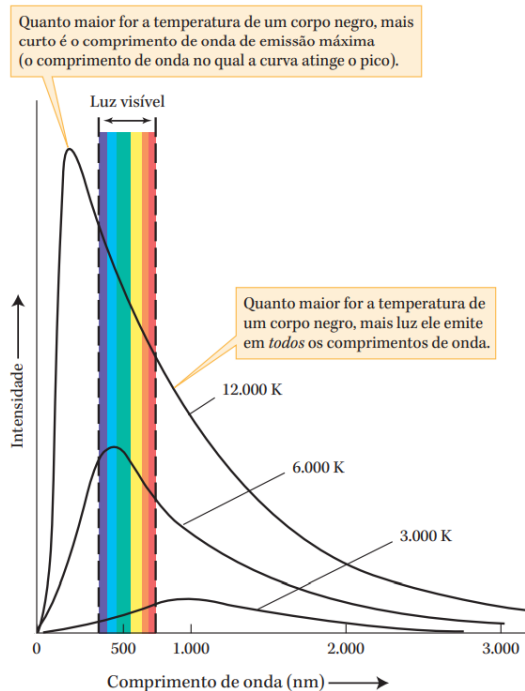
resista, a cor da luz emitida será alaranjada, amarelada e até branca, respectivamente. Considerando esse exemplo apenas no imaginário, se o aquecimento continuar, então, a emissão tenderá para o azul. Isso mostra que a temperatura influencia na cor da emissão do objeto. Se plotamos um gráfico de intensidade dessa radiação em relação ao comprimento de onda correspondente, teremos então o espectro de emissão eletromagnética do corpo. Isso é muito importante na astrofísica, pois o pico de emissão define a cor do corpo aquecido. Portanto, podemos definir a temperatura da superfície de uma estrela a partir dessa propriedade, essa relação é fisicamente descrita pela lei de deslocamento de Wien, dada por:

$$\lambda_m = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} (mK)}{T} \quad (5)$$

Onde λ_m é o comprimento para qual a energia emitida é máxima, em metros, e depende somente da temperatura da superfície do corpo, T , em Kelvin.

Como o aquecimento dos corpos geram emissão em todos os comprimentos de ondas, porém intensidades diferentes, então os espectros de emissão de radiação dos corpos podem ser modelados, matematicamente, pelo comportamento de um corpo negro. Esse corpo ideal absorve toda a radiação eletromagnética que o atinge, esquentando-o, que, então reemite, mas com diferentes intensidades e em todos os comprimentos de onda [4]. A Figura 2 mostra três curvas de corpo negro para diferentes temperaturas e seus respectivos picos de emissão. Quanto maior a temperatura menor será o comprimento de onda do pico de emissão, conforme a Lei de Wien.

Figura 2 - Curvas de corpo negro. Cada curva mostra a intensidade de radiação em uma ampla variação de comprimentos de ondas emitidos por um corpo negro em uma determinada temperatura.



Fonte: Figura 4-2 extraída de [4].

Para determinar a temperatura da superfície do Sol, ou de outra estrela, basta comparar o seu espectro de radiação com a curva de um corpo negro mais próximo. Além disso, com o pico dessa radiação é possível determinar sua cor, o Sol, por exemplo, possui temperatura superficial de 5800 K e, portanto, sua cor beira a região da cor azul e o verde, mas vale

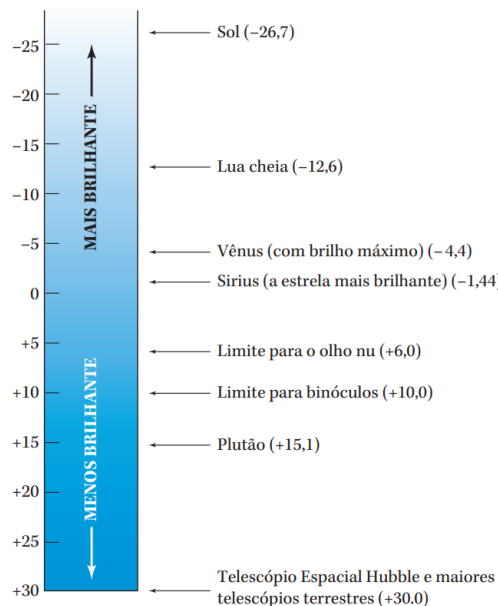
ressaltar que ele emite ondas eletromagnéticas em todas as cores. Uma pergunta pode ser lançada após essa afirmação: Então qual a cor do Sol? Claro que responder isso vai depender de fatores biológicos da visão e da interação com atmosfera terrestre, mas não cabe detalhar isso aqui, pode consultar a referência [4] para se aprofundar nessa questão, mas o fato é que o Sol visto do espaço parece branco aos nossos olhos.

LUMINOSIDADE

Olhar para o céu noturno e limpo é fascinante, cada pontinho brilhante é um mistério para decifrar. As estrelas parecem competir por atenção, com seus brilhos, mais intensos do que outras, dessa maneira, lanço a seguinte pergunta: As estrelas mais brilhantes são maiores? A resposta disso levou muito tempo, mas hoje sabemos que as estrelas possuem uma magnitude de brilho aparente, porém elas não estão na mesma distância, então, não poderíamos afirmar se o brilho que vemos da Terra corresponde ao seu verdadeiro.

O brilho das estrelas medido sem levar em conta suas distâncias até a Terra é chamado de magnitude aparente [4]. Atualmente utiliza-se a estrela Vega, na constelação de Lira, como referência 0.0 na escala de magnitudes. Dessa maneira, os corpos mais brilhantes que elas possuem valores negativos e as de menores, positivos. A Figura 3 mostra algumas magnitudes aparentes e os limites de observações. Mas se as estrelas não estão nas mesmas distâncias, como determinar, então, seu verdadeiro brilho? Para isso precisamos ter medidas que não dependam da distância, são elas a magnitude absoluta⁴ e luminosidade.

Figura 3 - O brilho dos objetos no céu é dado pelas suas magnitudes aparentes.



Fonte: Figura 11-2 - b de [4].

Imagine o Sol, uma fonte de luz isotrópica⁵, quanto maior a distância dele menor será o fluxo (Energia por área) e essa relação cai com o inverso do quadrado da distância, portanto:

⁴ Magnitude absoluta é o brilho que cada estrela teria se estivesse a uma distância de 10 parsec (pc) (1 pc = 3.0857×10^{16} metros)

⁵ Fonte Isotrópica emite a mesma radiação em todas as direções.

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (6)$$

Onde **F** é o fluxo luminoso, **L** a luminosidade emitida pela estrela (energia por segundo ou potência) e **d** a distância da fonte até um ponto qualquer. Essa lei mostra como as distâncias influenciam na irradiação que chega até a Terra, por exemplo. Com a magnitude aparente e a distância que, para essa, existem diversas técnicas para determiná-la, como por exemplo a paralaxe estelar, pode-se determinar a magnitude absoluta através da relação:

$$M = m - 5 \log\left(\frac{d}{10}\right) \quad (7)$$

Através dessa equação é possível criar modelos de evolução estelar, mas a magnitude absoluta é uma comparação entre duas estrelas. Então, para determinar a quantidade total de potência eletromagnética emitida pela estrela, recorremos à luminosidade. Quanto maior for essa propriedade, mais brilhante é o objeto, logo mais negativa será sua magnitude absoluta. É usual usar o Sol como referência ($L_{\odot} = 3,83 \times 10^{25} \text{ W}$), mas pode ser determinada por:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (8)$$

Onde **R** é o raio da estrela, **T** a temperatura em Kelvin, **σ** a constante de Boltzmann (vale $1,380649 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$).

PARALAXE ESTELAR

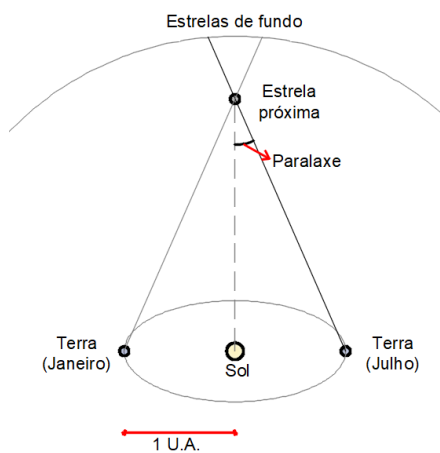
Essa técnica consiste em medir o deslocamento aparente de uma estrela próxima em relação a um referencial distante. Isso ocorre devido à mudança do ponto de vista do observador, veja a Figura 4. Como a distância da Terra ao Sol é conhecida⁶, então, é possível medir o ângulo de paralaxe, em segundos de arco ("), quando a Terra está em lados opostos, ou seja, 6 meses depois da primeira observação.

Recorrendo a trigonometria básica, temos:

$$D_{\text{Sol-Estrela}} = \frac{1}{\tan(\theta)} \quad (9)$$

Onde **D** é a distância da estrela ao Sol e **θ** o ângulo de paralaxe. Esse resultado será em Unidades Astronômicas (U.A.).

Figura 4 - Paralaxe estelar.



Fonte: Adaptado de [5].

⁶ Distância Sol- Terra $\cong 150.000.000 \text{ km} = 1 \text{ U.A.}$ (Unidade Astronômica).

Não é possível utilizar essa técnica para calcular distâncias muito grande, devido a precisão da medida do ângulo ser prejudicada pelo fato de que quanto maior a distância, menos perceptível é o deslocamento aparente.

ESPECTROSCOPIA ESTELAR

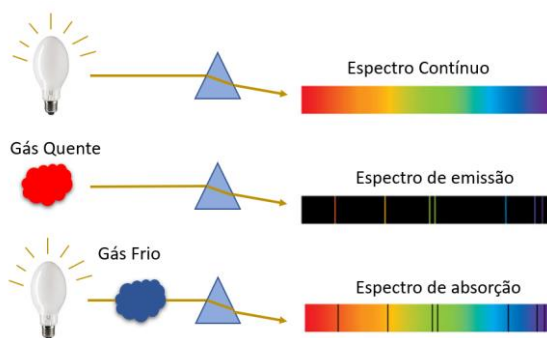
A fotometria é a técnica que os cientistas utilizam para medir o fluxo da radiação eletromagnética e, com isso, determinar a cor de um corpo, portanto, estimar sua temperatura. Mas estudar a luz, pode fornecer mais informações importantes sobre esse objeto, daí surge a espectroscopia estelar.

Essa técnica consiste em decompor a luz incidente, em um prisma ou uma rede de difração, nos diferentes comprimentos de onda. Podemos perceber um fenômeno desse ocorrendo quando a luz do Sol interage com gotas de chuvas, formando o arco-íris [6]. É possível determinar propriedades como temperatura, densidade e composição química tanto dos objetos que estão emitindo luz quanto do meio entre ele e o observador.

Através do bico de Busen⁷, foi possível observar os espectros de diversos elementos químicos e foi constatado que não eram contínuos e cada elemento possuía uma série de linhas brilhantes, representando suas assinaturas espectrais. Essa descoberta foi crucial para determinar a composição química das estrelas. Veja a Figura 5 para compreender o que o físico Gustav Robert Kirchhoff definiu como tipos básicos de espectros, são eles:

- ✚ Um corpo opaco quente, sólido, líquido ou gasoso, emite um espectro contínuo.
- ✚ Um gás transparente produz um espectro de linhas brilhantes (de emissão). O número e a posição dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás.
- ✚ Se um espectro contínuo passar por um gás à temperatura mais baixa, o gás frio causa a presença de linhas escuras (absorção).

Figura 5 - Os três tipos de espectros na classificação de Kirchhoff: o contínuo, o de emissão e o de absorção.



Fonte: Figura 17.05 de [6].

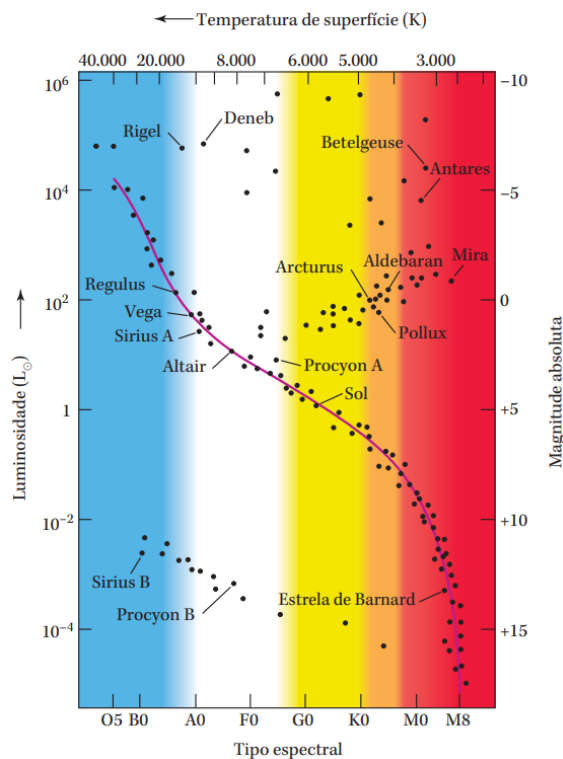
A espectroscopia foi fundamental para a astronomia e a astrofísica, afinal, estudar a luz das estrelas é a única forma de decifrar as estrelas.

DIAGRAMA H-R

⁷ O bico de Bunsen, ou de gás, foi criado pelo químico Robert Wilhelm Bunsen (811-1899), tinha uma chama incolor, de maneira que, quando um elemento químico era colocado sobre a chama, as cores emitidas eram as da substância, e não da chama [6].

Como já discutido anteriormente, a massa é a principal propriedade de uma estrela que ditará como será sua evolução e morte. Foi percebido que essa propriedade influencia na luminosidade e a temperatura desses corpos e, a partir disso, foi criado o diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R)⁸, veja Figura 6. A partir deste diagrama, foi possível mapear as estrelas com características semelhantes e, assim, classificá-las em tipos.

Figura 6 - Diagrama H-R. s. Cada ponto neste gráfico representa uma estrela e as faixas de cores representam as suas cores.



Fonte: Figura 17-7 de [4].

Na região superior do diagrama H-R estão as estrelas classificadas como Supergigantes, exemplo Antares. Nessa região se encontram as maiores estrelas, com brilho intenso, até centenas de milhares de vezes mais intenso que o Sol. As vermelhas são as mais frias na superfície comparado com as azuis, exemplo da Rigel.

Abaixo das supergigantes, à direita, se encontram as estrelas gigantes, essas possuem brilho mais intenso do que outras com a mesma temperatura dentro da sequência principal, portanto são maiores que essas, exemplo da Aldebaran.

Na sequência principal estão as estrelas como Sol, Vega e Sirius A. Nessa faixa estão as estrelas com equilíbrio hidrostático realizado pela força da pressão e gravitacional.

Abaixo da sequência principal estão as anãs brancas que são remanescentes estelares e são altamente densas e sua luminosidade vem de origem térmica e não da fusão nuclear.

A MORTE DE UMA ESTRELA

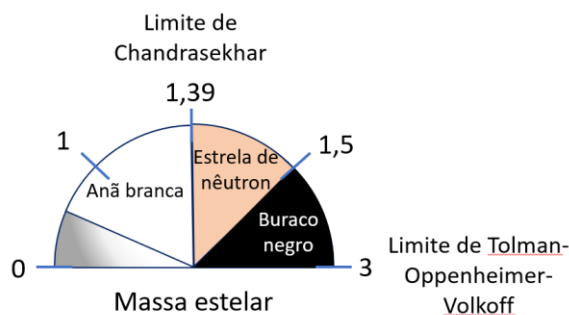
As estrelas passam a maior parte de sua evolução dentro da sequência principal, porém o tempo dentro dessa fase depende de sua massa, quanto maior, mais rápido será o processo de fusão nuclear e, portanto, mais curta será sua vida.

⁸ O diagrama H-R é o gráfico de luminosidade estelar ou magnitude absoluta *versus* temperatura de superfície ou tipo espectral.

Estrelas de pequena massa tornam-se supergigantes antes de se expandirem em nebulosas planetárias⁹ e seu núcleo exposto será uma anã branca. Já as estrelas de grande massa, podem aquecer o núcleo a ponto de fundir e produzir elementos mais pesados, indicando um fim violento para essa estrela, as chamadas supernovas. O núcleo que sobra desses remanescente de estrelas podem, dependendo da sua massa, ser uma estrela de Nêutrons, que são corpos incrivelmente densos e composto basicamente de nêutrons, mas se a massa do núcleo exposto da supernova for muito grande, então o colapso gravitacional não terá barreiras e então surge um buraco negro. Estes corpos possuem uma gravidade tão intensa que nem mesmo a luz escapa, então, se não há emissão de radiação, não poderíamos ver, restando recorrer a teoria da relatividade geral ou observar os seus efeitos sobre a vizinhança, para compreendê-los.

Podemos quantificar os limites para se tornar uma anã branca, estrela de nêutrons ou um buraco negro, comparando com a massa do Sol ($M_{\odot}$), veja a Figura 7. Compreendê-los é fundamental para determinar a evolução e morte das estrelas, porque dessa forma podemos, a partir do diagrama H-R, e, com suas propriedades prever quando e como será o seu fim. Dessa maneira, se o núcleo exposto de uma estrela ser até 1,39 vezes a massa do Sol, o fim será uma anã branca, até 1,50 vezes será uma estrela de nêutrons e caso atinja 3,0 vezes então o colapso gravitacional será inevitável, surge o buraco negro.

Figura 7 - Limites impostos para um núcleo remanescente de uma estrela se tornar uma anã branca, estrela de nêutron ou um buraco negro.



Todo o conteúdo abordado neste artigo mostra como estudar a evolução estelar envolve diversos conteúdos da física e da química. Portanto, podemos levá-lo para a sala de aula, principalmente no ensino médio, de forma mais aprofundada, porque as estrelas são fascinantes e, graças a elas, o universo não é só escuridão, mas cheio de luz e elementos químicos e, além disso, fornece a energia que permite a vida na Terra e, quem sabe, para um outro planeta com vida. A questão que buscaremos responder é a seguinte: Como abordar esse conteúdo utilizando, além da teoria exposta, experimentos de baixo custo e de fácil construção?

EXPERIMENTO PARA SALA DE AULA: LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA

É importante o professor discutir a lei do inverso do quadrado da distância por meio de uma atividade experimental, porque isso desperta participação e o interesse dos estudantes. Além disso, diversos fenômenos da natureza seguem esse princípio, como campo elétrico, gravitacional e a luminosidade de uma fonte pontual.

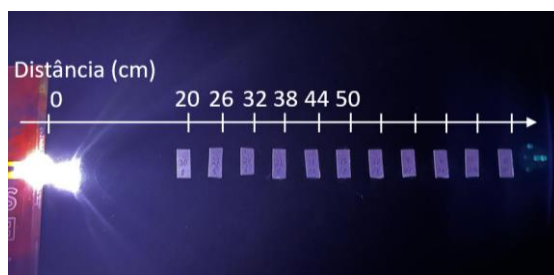
⁹ As nebulosas planetárias têm origem na ejeção de massa das estrelas gigantes vermelhas.

Como sugestão, o professor pode usar uma pequena lanterna, um celular com câmera, instalar um aplicativo de medidor de luz (existem diversos gratuitos), uma régua e uma mesa onde será marcada as distâncias.

Figura 8 - Lanterna de chaveiro, mas pode ser utilizada a lanterna de um celular.



Figura 9 - Sobre um livro, foi colocada a lanterna e dada uma distância de 20 cm para começar as marcações das medidas, espaçadas a cada 6 cm.



Existem aplicativos para celulares tanto para o sistema *Android* quanto para *IOS*. Nesse caso foi utilizado o *Light Meter* que faz a medição a partir do sensor da câmera do aparelho e utiliza como unidade de medida o Lux. Essa unidade é derivada do Sistema Internacional de Medidas e é a densidade de intensidade luminosa, conhecida como iluminância.

Embora o exemplo mostrado foi realizado em um ambiente com pouca iluminação ambiente, pode ser feito em uma sala de aula com iluminação, porém é necessário verificar as distâncias sugeridas e espaçamentos dos pontos de medidas. Isso pode ser feito verificando se a curva de ajuste se aproxima da lei de decaimento. Além disso, é importante o espaçamento inicial da fonte, pelo fato de que ela deve ser considerada pontual para valer a lei, caso contrário, os resultados podem divergir do esperado. Nesse experimento foi anotado as distâncias e as respectivas iluminâncias, assim, a Tabela 1 foi organizada.

Tabela 1 - Dados experimentais

Distância (m)	Iluminância (LUX)
0,20	192
0,26	123
0,32	98
0,38	77
0,44	49
0,50	26

De posse dos dados, foi utilizado uma calculadora online¹⁰ para aproximação de função com análise de regressão. Foi escolhida uma função do tipo,

$$\hat{y} = ax^b,$$

onde:

$$b = \frac{n \sum (\ln x_i \cdot \ln y_i) - \sum \ln x_i \cdot \sum \ln y_i}{n \sum \ln^2 x_i - (\sum \ln x_i)^2} \quad (10)$$

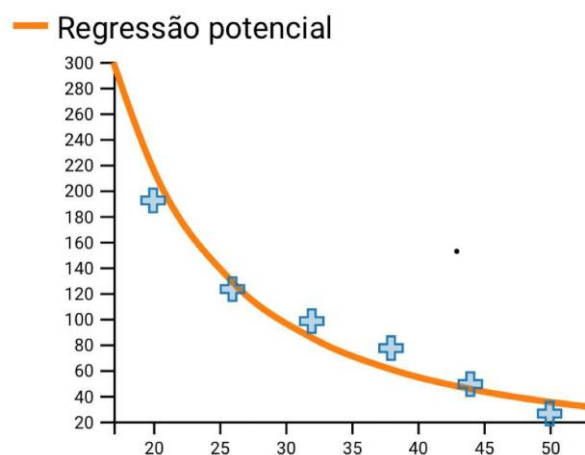
$$a = \exp\left(\frac{1}{n} \sum \ln y_i - \frac{b}{n} \sum \ln x_i\right) \quad (11)$$

Foi utilizado dois dígitos de precisão nos cálculos e o resultado foi a função $y = 8,84 x^{-1,99}$. A aproximação do coeficiente **b** foi excelente, visto que era esperado um valor mais próximo possível de -2, validando a lei do inverso do quadrado da distância. A Figura 10 mostra o gráfico resultante do experimento. Para verificar a acurácia das medidas, pode-se verificar o chamado coeficiente de correlação **R**, dado pela fórmula:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

No experimento feito foi encontrado o valor de $R = 0,97$, quanto mais próximo de 1,0 melhor é a correlação entre as medidas experimentais.

Figura 10 - Gráfico gerado pela regressão potencial.



Com esse experimento, o professor pode mostrar como é o comportamento do decaimento da luz de uma fonte pontual, como é o caso da luz das estrelas, inclusive o Sol. Se sabemos a luminosidade e medimos seu fluxo, então podemos determinar a distância até nós.

¹⁰ Disponível em:

<https://pt.planetcalc.com/5992/?xstring=0%2C20%200%2C26%200%2C32%200%2C38%200%2C44%200%2C50&ystring=192%20123%2098%2077%2049%2026&dolinear=0&doquadratic=0&dopower=1&docubic=0&doexponential=0&dologarithmic=0&dohyperbolic=0&doexponential=0>

EXPERIMENTO PARA SALA DE AULA: ESPECTROSCÓPIO CASEIRO

Como visto, a espectroscopia é fundamental para estudar as estrelas e para levar esse assunto para a sala de aula, o professor pode montar um espectroscópio simples. O objetivo dessa atividade é mostrar como a luz se decompõe e como podemos estudar a composição química da fonte por meio de seu espectro de radiação visível. Para isso, basta ter em mãos uma caixa pequena, tesoura, fita isolante, lâmina de barbear, celular com câmera e um CD (*Compact Disk*). A Figura 11, Figura 12 e a Figura 13 mostram esses itens.

Figura 11 - Caixa pequena. Neste caso é de um remédio, mas pode ser de outro tipo.



Figura 12 – Tesoura e fita isolante



Figura 13 – Lâmina de barbear e CD



Figura 14 - Câmera do celular utilizada no experimento. Essa área será encaixada na caixa de papel para evitar o excesso de luz externa.



Para executar o espectroscópio, deve-se cortar os dois lados da caixa de papel, direção longitudinal, de um lado recortar do tamanho do suporte da câmera do celular e do outro uma entrada fina, por onde a luz deve passar, será limitada

pela lâmina de barbear separada em duas partes. Além disso, toda a caixinha deve ser revestida com a fita isolante, conforme a Figura 15.

Figura 15 - lado esquerdo, entrada limitada pelas lâminas de barbear, deve ser a mais fina possível para penetrar a luz da fonte desejada. No lado direito é mostrado a saída da luz do tamanho do suporte da câmera do celular, aí se encontra o pedaço de CD sem a sua película reflexiva.

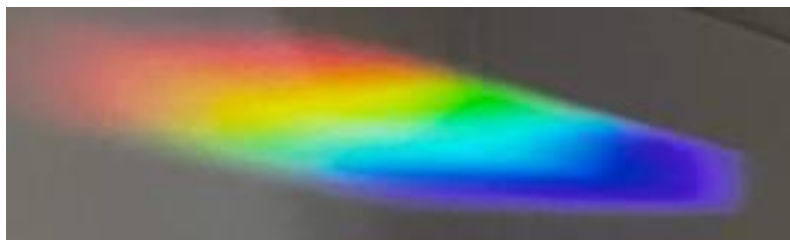


O experimento pode ser feito com diferentes tipos de lâmpadas e a luz do Sol, nesse caso, para não apontar diretamente para ele, recomendo mirar em uma nuvem qualquer. A Figura 16 mostra como foi feita essa observação e registro fotográfico, e a Figura 17 mostra o espectro solar isoladamente.

Figura 16 - Registro do espectro da luz solar.



Figura 17 - Espectro da luz solar



Com esse experimento foi possível demonstrar, de forma qualitativa, o fenômeno de difração da luz e a espectroscopia de emissão e absorção de luz visível, tão usada na astronomia e astrofísica.

EXPERIMENTO PARA SALA DE AULA: MEDINDO DISTÂNCIAS COM A PARALAXE

Encontramos a paralaxe em diversas aplicações, não somente na astronomia. Na biologia, a nossa noção de profundidade, pela visão, ocorre justamente pelos pontos de vista ligeiramente diferentes em cada olho, dada pela distância entre si. Na tecnologia, é possível encontrar brinquedos de visão 3D até técnicas de modelagem tridimensional de terrenos a partir de fotografias aéreas. São diversas aplicações e o professor poderá trabalhar esse temas realizando alguns experimentos em sala de aula.

O primeiro experimento sugerido é qualitativo, apenas para o estudante identificar a nossa visão estereoscópica. Consiste em marcar o quadro e distanciar o estudante, pedir para bloquear a visão da marcação com o polegar, com um olho fechado, feito isso, fechar o olho e abrir o outro, sem movimentar o polegar. Nesse momento será possível identificar o deslocamento aparente devido a mudança do ponto de vista da marcação, veja Figura 18 para compreender melhor o experimento.

Figura 18 - Experimento qualitativo da paralaxe



Outro experimento possível, quantitativo, consiste em encontrar o ângulo de paralaxe utilizando um transferidor, esquadro, suporte, laser, fita isolante e um pincel para quadro, veja-os na Figura 19, Figura 20 e Figura 23. O esquadro pode ser substituído por uma régua de madeira.

Figura 19 – Transferidor (imagem superior) e esquadro (imagem inferior) de madeira. A escolha deles foi devida às suas dimensões



Figura 20 - Laser (imagem superior) e suporte de madeira onde o laser foi fixado (imagem inferior)



Figura 21 - Fita métrica (imagem da esquerda) e pincel para quadro (imagem da direita)



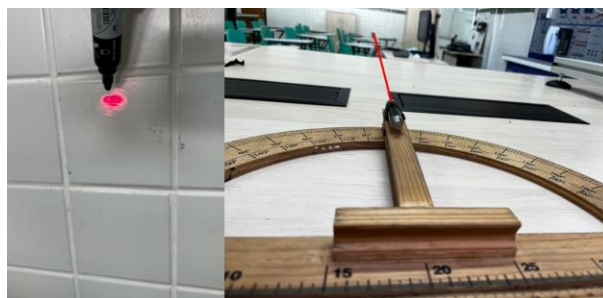
O experimento foi feito sobre uma mesa plana posicionada próximo a uma parede. O transferidor e o esquadro foram postos paralelos entre si, com a marcação zero coincidindo entre si, veja a Figura 22. O laser foi acionado continuamente, enrolando a fita isolante de modo a pressionar o botão e fixar no suporte. Depois disso, foi colocado de modo a apontar para a parede oposta e na direção de 90° do transferidor.

Figura 22 - Esquema da primeira visada



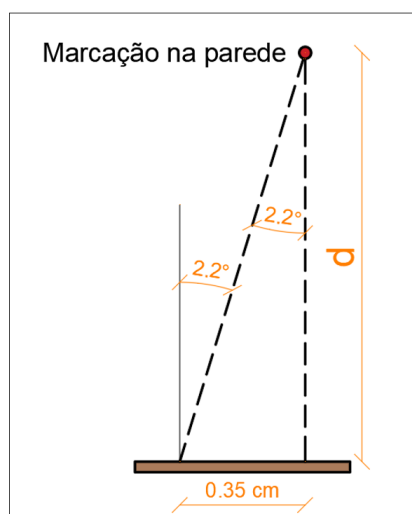
Foi marcado com o piloto a posição em que a luz atinge a parede oposta, esse é o primeiro ponto de vista, veja a Figura 23.

Figura 23 - Primeiro ponto de vista. A marcação na parede representa o ponto a ser determinada a distância



O segundo ponto de vista foi feito deslocando o conjunto transferidor, suporte e laser ao longo da régua, fixa. Foi deslocado em 35 cm, e nessa nova posição, o laser foi apontado para o mesmo ponto, mantendo a extremidade do suporte no centro do transferidor, nesse momento foi anotado o ângulo formado, nesse caso, 2,2°. A Figura 24 mostra que, por relação entre triângulos, o valor anotado é o mesmo da paralaxe.

Figura 24 - Determinação do ângulo de paralaxe. O desenho está fora de escala.



Dessa maneira, a distância pode ser determinada pela relação da tangente:

$$d(m) = \frac{0,35}{\tan (2,2)} \quad (13)$$

Foi encontrado o valor de 9.11 m. Esse valor foi confirmado utilizando a trena, que foi de 10.47 m. Deve-se tomar cuidado, porque a distância medida foi do centro do transferidor até a marcação na parede oposta.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensino da evolução estelar envolve diversos temas das ciências, desde a física, química e matemática. Dessa maneira, o professor pode trabalhar de forma interdisciplinar e contextualizada com o cotidiano dos estudantes, por meio de uma metodologia eficiente e significativa.

Esse artigo mostra como o professor pode abordar a história das estrelas, além de algumas sugestões de experimentos de baixo custo. Entretanto, foi possível identificar alguns pontos negativos que podem ser aprimorados em trabalhos futuros.

No experimento do espectroscópio caseiro, sugerimos buscar uma metodologia para avaliação, além da qualitativa, quantitativa dos espectros observados. Dessa maneira, o professor poderia trabalhar o tratamento das imagens usando recursos computacionais e banco de dados espectrais.

No experimento da determinação da paralaxe, foi observado muito cuidado em movimentar o conjunto do primeiro ponto de vista para o segundo, porque qual deslocamento da linha de base, dada pela régua, propagava erros na medida final. Dessa maneira, sugerimos buscar uma forma de diminuir essa possibilidade, talvez fixando a base da mesa melhora a precisão do experimento.

REFERÊNCIAS

- [1] GREGORIO-HETEM, J. Jatenco-Pereira, V. Oliveira, C. M. Fundamentos da Astronomia. 2010. Apostila AGA215 – Capítulo 11. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) - Universidade de São Paulo (USP).
- [2] BRASIL, Base Nacional Comum Curricular (Ministério da Educação, Brasília, 2018).
- [3] Bandecchi, M., Horvath, J.E. e Bretones, P.S. O equilíbrio estelar e a existência de uma massa máxima para as estrelas. Revista Brasileira de Ensino de Física [online]. 2019, v. 41, n. 3 [Acessado 6 Outubro 2022], e20180250. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0250>>. Epub 10 Jan 2019. ISSN 1806-9126. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0250>.
- [4] COMINS, N. F.; KAUFMANN III, W. J. Descobrindo o Universo, 8ª edição, Editora Bookman, 2010.
- [5] GREGORIO-HETEM, J. Jatenco-Pereira, V. Oliveira, C. M. Fundamentos da Astronomia. 2010. Apostila AGA215 – Capítulo 8. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) - Universidade de São Paulo (USP).
- [6] SARAIVA, Maria de F. O.; FILHO, Kepler de S. O.; MÜLLER, Alexei M. Aula 17: Espectroscopia. 2010. Notas de Aula. Instituto de Física (IF) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).