

# Estrelas: propriedades e ciclo de vida

Carlos Daniel Caldeira Silva, Victor Hugo Nantet Binoti e Bernardo Brunoro Dilem

Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Alegre

---

## Resumo

Desde os primeiros passos da humanidade, observamos esses distantes corpos celestes com admiração. Neste artigo, abordaremos as estrelas, suas principais características e também suas diferenças, discutindo as estrelas variáveis. Também abordaremos seu ciclo de vida, desde o nascimento até a morte estelar, e introduziremos desde as pequenas anãs brancas até os poderosos buracos negros.

## Abstract

Since humanity's first steps, we have watched these distant celestial bodies with wonder. In this article, we will approach the stars, their main characteristics and also their differences, discussing the variable stars. We will also cover their life cycle, from birth to stellar death. And we will introduce since small white dwarfs to powerful black holes.

---

**Palavras-chave:** estrelas, curva de luz, estrelas variáveis, espectro, fusão nuclear, estrelas de nêutrons.

**Keywords:** stars, light curve, variable stars, spectrum, nuclear fusion, neutron stars.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v4n1.39886](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n1.39886)

## 1 Introdução

Antes de iniciar a leitura desse tema, é necessário entender, de maneira geral, o que são estrelas e qual sua importância. Estrelas são grandes corpos celestes, com luz própria e que são capazes de produzir energia por meio de reações que ocorrem em seu interior. Mas, afinal, por que será que estes pontinhos brilhantes no céu seriam importantes para a Terra e para todo o universo? A verdade é que além de produzirem luz e energia, as estrelas também são as principais fábricas dos elementos químicos de nosso universo. De fato, elementos como carbono, oxigênio e nitrogênio, que juntos com o hidrogênio<sup>1</sup> compõem 99% de nossas células, são produzidos por estrelas [1]. Como diz Carl Sagan: “somos todos poeira das estrelas” [2]. Somos um remanescente estelar.

---

<sup>1</sup>O hidrogênio, por conter apenas um próton em seu núcleo, é o elemento químico mais simples e mais fácil de se produzir, tendo sido formado, em sua maior parte, antes mesmo da existência das estrelas.

## 2 Conhecendo as características das estrelas

Agora que já fizemos uma breve introdução sobre o que são e qual a importância das estrelas, iremos destacar suas principais características. Veremos que, embora possuam diversas características em comum, as estrelas também são bastante diversificadas.

### 2.1 Massa

Estrelas são formadas principalmente por bárions, que são partículas fundamentais possuidoras de massa. Como exemplo de bárions, temos os prótons e os nêutrons, que compõem o núcleo de todos os elementos químicos (como o hidrogênio e o hélio, por exemplo, que são os elementos mais abundantes nas estrelas). Além de bárions em seu núcleo, os elementos químicos também possuem elétrons, localizados em uma região ao redor do núcleo chamada eletrosfera. Os elétrons são classificados como léptons e, embora sejam fundamentais nas reações químicas das quais tais elementos participam, são praticamente irrelevantes no que diz respeito à sua massa, uma vez que são muito mais leves que os prótons e

os nêutrons (quase duas mil vezes mais leve). A massa de uma estrela determina sua vida, sua gravidade e sua própria existência. Estrelas com menos massa vivem muito mais que estrelas de maior massa. Para se ter uma ideia, caso o Sol, que é uma estrela, tivesse 10% da massa que ele possui atualmente – cerca de  $1,9891 \times 10^{30}$  kg, ou uma massa solar ( $1 M_{\odot}$ ) – ele viveria aproximadamente 1 trilhão de anos, o que é 91 vezes mais do que o tempo de vida estimado para ele (11 bilhões de anos). Estrelas mais massivas também são muito mais raras que estrelas menos massivas, uma vez que vivem menos. As estrelas variam desde  $0,1 M_{\odot}$  à valores muito maiores,<sup>2</sup> mas esse número raramente passa de  $60 M_{\odot}$  [3]. A estrela com maior massa conhecida atualmente é a R136a1, situada na constelação de Dourado, com uma massa de  $196 M_{\odot}$ . Essa estrela viverá no total 3 milhões de anos, bem menos que o Sol, devido a sua enorme massa.

## 2.2 Temperatura

Ao contrário do que muitos pensam, estrelas não são enormes bolas de fogo. Elas, na verdade, são formadas por plasma. O plasma é um estado de agregação da matéria no qual suas partículas constituintes estão em tão alto grau de agitação que suas energias superam a energia que mantém os elétrons ligados ao núcleo atômico. Como consequência, alguns dos elétrons se desprendem de seus átomos, formando um gás ionizado. Uma vez que, fisicamente, a temperatura é o grau de agitação de partículas, um plasma possui altíssimas temperaturas. A temperatura superficial de uma estrela varia principalmente de 2.000 K a 40.000 K, embora existam algumas poucas estrelas que passam disso. Um exemplo é a estrela WR 102, com uma temperatura igual a 200.000 K, sendo a estrela com maior temperatura superficial conhecida. Já no núcleo de uma estrela, a temperatura é incrivelmente maior, variando de 10 milhões a 5 bilhões de Kelvins. As estrelas são classificadas pela temperatura por meio da classe espectral, que compreende as classes M, K, G, F, A, B e O, com a temperatura aumentando gradualmente desde a classe M até a classe O, na ordem apresentada (ver Figura 1).

Há também subdivisões nas classificações,

<sup>2</sup>Embora não haja um limite aceito, acredita-se que exista sim um limite físico superior para a massa de uma estrela.

sendo representadas por algarismos de 9 a 0, sendo o 9 mais quente e 0 mais frio. O Sol, por exemplo, é uma estrela de classe G2 e muitos astrobiólogos afirmam que o Sol não é uma estrela com temperatura ideal para vida, por ser quente demais, sendo mais propício uma estrela de classe K [5]. A temperatura também influencia na cor das estrelas: Estrelas mais quentes são azuis, ficando amarelas, laranjas e vermelhas com a diminuição da temperatura.

## 2.3 Luminosidade e brilho

Estas duas propriedades são provavelmente as mais marcantes das estrelas. As estrelas certamente são muito instigantes desde os primórdios da humanidade. Os antigos muitas vezes as viam como seres divinos por representarem a luminosidade, sendo observadas com admiração [6] A luminosidade que as estrelas possuem é a quantidade de energia luminosa emitida em sua superfície a cada segundo, sendo medida em Watts (W) ou luminosidades solares ( $L_{\odot}$ ), sendo que uma luminosidade solar ( $1 L_{\odot}$ ) equivale a  $3,9 \times 10^{26}$  W – ou 40 trilhões de megatons/s, que equivale a 4 quatrilhões de bombas como a de Hiroshima explodindo por segundo. A luminosidade é calculada pela equação:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4, \quad (1)$$

sendo  $R$  o raio da estrela,  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann e  $T$  a sua temperatura superficial. Por outro lado, o brilho é a quantidade de energia luminosa que incide sobre uma área de  $1 \text{ m}^2$  a cada segundo, sendo medido em  $\text{W}/\text{m}^2$ . Seu valor é calculado pela lei do inverso do quadrado, que diz que um aumento na distância resulta na diminuição do brilho de maneira inversamente proporcional ao seu valor elevado ao quadrado:

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

Embora em uma primeira impressão a luminosidade e o brilho sejam parecidos, eles são bem diferentes e usados para diferentes situações. De maneira geral, o brilho sempre vai depender da distância do objeto luminoso a um dado referencial, enquanto a luminosidade não depende da distância, já que ela é própria da estrela [7]. É como pensar em uma vela: Se afastar a vela, o brilho diminui, e se aproximá-la, aumenta. Mas

COR	CLASSIFICAÇÃO	TEMPERATURA (K)	COMPOSIÇÃO
AZUL	O	30 mil	Hélio ionizado e metais, com linhas de hidrogênio de baixa intensidade
AZUL-CLARO	B	20 mil	Hélio neutro e metais ionizados, com linhas de hidrogênio de alta intensidade
BRANCA	A	10 mil	Linhas de hidrogênio dominantes e metais fracamente ionizados
AMARELO-CLARO	F	7 mil	Metais neutros e fracamente ionizados, com linhas de hidrogênio de alta intensidade
AMARELA	G	6 mil	Cálcio fracamente ionizado e metais neutros, com linhas de hidrogênio de baixa intensidade
LARANJA	K	4 mil	Metais neutros e bandas moleculares
VERMELHA	M	3 mil	Metais neutros e bandas de óxido de titânio molecular

**Figura 1:** A classe espectral das estrelas e suas principais características. Fonte: Super Interessante [4]

a luminosidade é a mesma, a menos que o combustível para manter a vela acesa e irradiando energia diminua. A forma usada para classificação por meio da luminosidade é a de Morgan-Keenan (MK), observada na Figura 2. Portanto, o Sol é classificado como uma estrela G2V, sendo o G2 sua Classe Espectral e o V afirmando que ele é uma estrela anã. Outra grandeza relacionada ao brilho e à luminosidade de uma estrela é a sua magnitude, que pode ser apresentada de duas formas: aparente ou absoluta. A magnitude aparente ( $m$ ) de uma estrela está relacionada ao seu brilho ( $b$ ) medido da Terra e é expressa em uma escala logarítmica através da equação:

$$m = -2,5 \log(b) + C, \quad (3)$$

sendo  $C$  uma constante que define o ponto zero da escala.<sup>3</sup> O uso da escala logarítmica se dá devido a percepção de brilho do olho humano, que é logarítmica, e o fator  $-2,5$  decorre da classificação de Hiparco (160-125 a.C.), que atribuiu magnitude 6 às estrelas visíveis menos brilhantes e 1 à mais brilhante (cerca de 100 vezes mais brilhante que as de magnitude 6). Note que, pela equação (4), a diferença de magnitude entre dois corpos

<sup>3</sup>Normalmente utiliza-se a magnitude da estrela Vega como  $m = 0$  para se definir a constante  $C$

celestes 1 e 2 será dada por:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log\left(\frac{b_1}{b_2}\right). \quad (4)$$

Aplicando-se os valores atribuídos por Hiparco na equação acima, bem como a razão entre os brilhos, percebe-se facilmente a correção do fator  $-2,5$ . Já a magnitude absoluta está relacionada ao brilho que a estrela teria, também utilizando-se de uma escala logarítmica, ao ser vista a uma distância de 10 parsecs, ou 32,6 anos luz. Desta forma, enquanto a magnitude aparente nos traz uma informação útil do quão brilhante uma estrela nos parece ser (uma vez que é medida da Terra e, portanto, depende da distância que tal estrela está de nosso planeta), a magnitude absoluta nos traz uma informação útil sobre o brilho intrínseco de uma estrela (uma vez que é “medida” sempre a uma mesma distância). A diferença entre a magnitude aparente ( $m$ ) e absoluta ( $M$ ) de uma estrela é dada por:

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

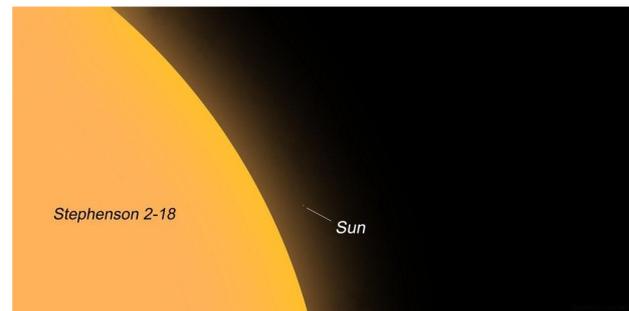
com a distância  $d$ , entre a estrela e a Terra, medida em parsecs.



**Figura 2:** Classificação de Morgan-Keenan. Fonte: Super Interessante [4]

## 2.4 Dimensões

Variando muito, o tamanho das estrelas é outra característica marcante. É medido em raios solares ( $R_{\odot}$ ), sendo que um raio solar ( $1 R_{\odot}$ ) equivale à 696.340 km. A dimensão muda no decorrer da vida. O Sol, daqui a aproximadamente 4,6 bilhões de anos, terá um raio 256 vezes maior que o de atualmente [8]. A maior estrela conhecida



**Figura 3:** Comparação entre Sol e Stephenson 2-18. Fonte: Astronomiaum [10]

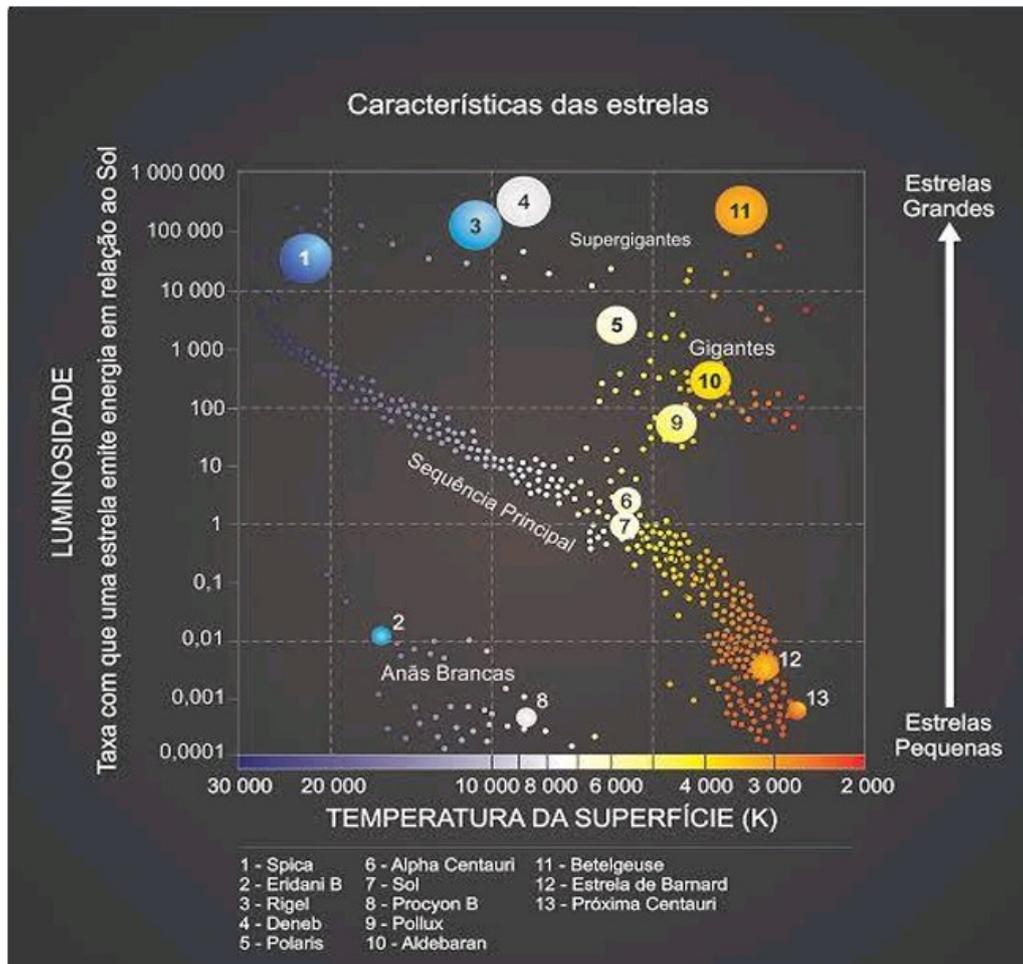
atualmente é Stephenson 2-18 [9], com  $2150 R_{\odot}$ , localizada na constelação do Escudo.

## 2.5 Diagrama Hertzsprung-Russell (HR)

Entre 1911 e 1913, Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell relacionaram a temperatura superficial de estrelas com a luminosidade, o que gerou o Diagrama HR. O Diagrama HR é um gráfico muito utilizado para visualizar e estudar a evolução e as diferentes fases da vida de uma estrela [11], podendo ser utilizado tanto na determinação da idade de aglomerados estelares (uma vez que, quando construído para um determinado aglomerado de estrelas, sua aparência dependerá fortemente da idade desse aglomerado), como na distância de certas estrelas. Na Figura 4, vemos um exemplo de um diagrama HR.

Ao examinarmos o digrama HR da Figura 4 com atenção, vemos que as estrelas não se distribuem igualmente por toda sua extensão, mas sim concentram-se em algumas de suas partes, estando a maioria delas alinhadas em uma estreita faixa diagonal que vai do canto superior esquerdo (onde estão as estrelas mais quentes e luminosas) ao canto inferior direito (mais frias e menos luminosas). Essa faixa é a chamada sequência principal e é onde a estrela passará a maior parte de sua vida. Há também concentrações notáveis se estendendo ao longo do topo do diagrama (mais luminosas), próxima ao canto superior direito (mais frias e luminosas) e próxima ao canto inferior esquerdo (mais quentes e menos luminosas). Explicaremos logo abaixo como essas concentrações estão relacionadas com a classificação das estrelas.

Começando com a concentração no topo do diagrama, temos as estrelas mais luminosas, de classe de luminosidade I, chamadas supergigan-



**Figura 4:** Diagrama HR relacionando a luminosidade e a temperatura superficial das estrelas. Note que há regiões de maior concentração estelar. Fonte: astro.if.ufrgs.br [12]

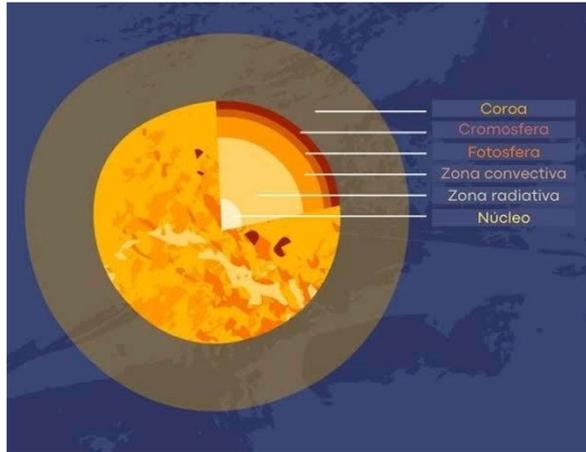
tes. Note que há supergigantes estendendo-se por praticamente toda a faixa de temperaturas mostrada. Abaixo destas, porém ainda acima da sequência principal e mais à direita, estão as estrelas de classe de luminosidade II e III, chamadas de gigantes. Sua posição indica que são estrelas mais frias e bastante luminosas, embora não tão luminosas quanto as de classe I. Já as estrelas da sequência principal possuem classe de luminosidade V e são chamadas de anãs. A posição que ocupam em um diagrama HR estende-se desde o canto superior esquerdo, onde concentram-se estrelas mais quentes e luminosas até o canto inferior direito, onde concentram-se as mais frias e menos luminosas, e é determinada por sua massa, uma vez que desta decorrem sua temperatura e sua luminosidade. Por fim, abaixo da sequência principal e pouco mais à esquerda, há uma concentração de estrelas chamadas anãs brancas. Sua localização indica que, em geral, são estrelas mais quentes e menos luminosas. Além de

nos auxiliar na classificação, o diagrama HR também possui importância histórica por ter levado os astrônomos a constatar que as estrelas evoluem. Tomando o Sol como exemplo, hoje ele está no centro da sequência principal, mas, como já foi dito, daqui a 5 bilhões de anos se tornará uma gigante vermelha, observado no canto superior direito do diagrama.

## 2.6 Estrutura interna das estrelas

Estrelas possuem 6 camadas [13] concêntricas com funções distintas, como podemos ver na Figura 5.

O núcleo, como já dito, é a camada central, mais quente e mais densa. Lá ocorrem reações que geram energia para a estrela. Na zona radiativa, a energia luminosa é transportada por irradiação, o que é um processo muito lento. Um fóton (partícula quantizada da radiação eletromagnética, ou seja, da luz) leva cerca de 150 mil



**Figura 5:** Representação da estrutura interna de uma estrela mostrando suas 6 camadas. Fonte: Mundo Educação [14]

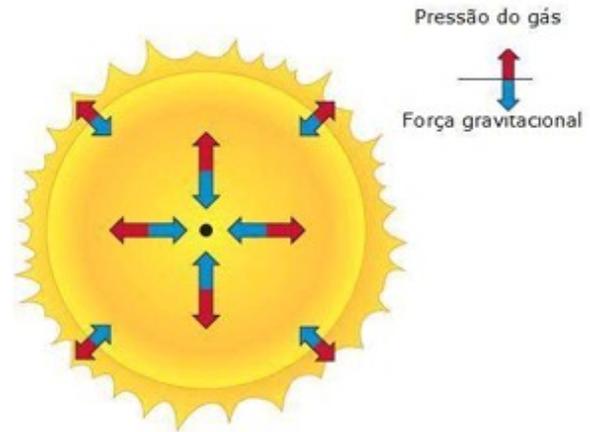
anos para atravessar a zona radiativa. Depois há a zona convectiva, onde a energia é transportada por convecção. Mais adiante há a fotosfera, que é a camada visível para nós, onde as temperaturas já são muito mais baixas, cerca de 5800 K. Já passando para a atmosfera estelar, encontra-se a cromosfera e a coroa. A cromosfera não é visível pois emite muito menos radiação que a fotosfera, sendo somente visível durante eclipses. Já a coroa é maior sendo, no Sol, sua maior camada. Seu tamanho tem algo em torno de 2 milhões  $R_{\odot}$ , e possui temperaturas incrivelmente grandes (cerca de 1-2 milhões Kelvin).

### 2.7 Equilíbrio hidrostático

Devido às enormes massas das estrelas, as partículas que a compõem experimentam uma intensa força gravitacional, puxando-as para seus centros. Para as estrelas não colapsarem devido à sua própria gravidade, é necessário algo para contrabalançá-la. Esse contrabalanço é fornecido pela pressão dos gases estelares, que empurram suas partículas constituintes para fora. Esses dois vetores, se forem iguais, anulam-se e é obtido o equilíbrio hidrostático.

### 3 Ciclos de queima

Para sustentarem sua pressão interna, e consequentemente manterem o equilíbrio hidrostático, é necessário que as estrelas produzam energia. Essa energia é obtida por meio da fusão nuclear, que é a fusão de núcleos de um elemento químico,



**Figura 6:** Representação do equilíbrio hidrostático em uma estrela. Note que a pressão do gás (setas vermelhas) e a atração gravitacional (setas azuis) se equilibram em cada ponto, sendo maiores nas partes mais internas. Fonte: docplayer.com.br [15]

com o produto sendo um elemento mais pesado que o original e energia.<sup>4</sup> O primeiro e principal elemento fundido pelas estrelas é o hidrogênio. Estrelas, em geral, queimam hidrogênio durante 90% de sua vida. O hidrogênio é fundido por meio do ciclo próton-próton [1], no qual quatro prótons de hidrogênio fundem-se e, depois de uma série de reações no núcleo estelar, obtêm-se hélio (um elemento mais pesado que o hidrogênio), luz e energia. Porém, quando o hidrogênio no núcleo se esgota, começa a fusão do hélio e, após o hélio, a estrela segue queimando elementos cada vez mais pesados, como vemos na Figura 7.

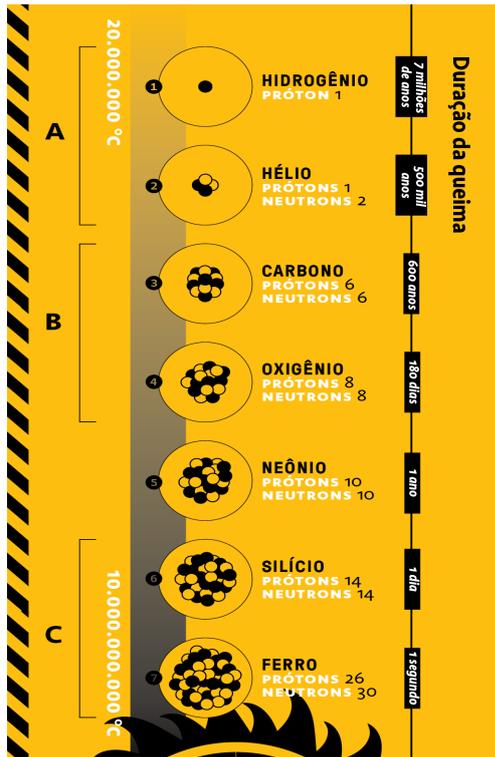
Caso uma estrela tenha massa o suficiente, sua última fase produzirá ferro. A partir deste elemento, a fusão nuclear passa a consumir energia, ao invés de produzi-la (como podemos ver na Figura 8), e, portanto, não poderá mais ser um mecanismo para gerar a pressão necessária para manter o equilíbrio hidrostático. Desta forma, tal equilíbrio é interrompido e a estrela implode, dando origem a uma supernova.

Um acréscimo de energia por meio das fusões nucleares resulta na perda de massa estelar, de acordo com a famosa equação

$$E = mc^2, \quad (6)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz. A equação (6) faz parte da teoria da relatividade especial, apresentada por Albert Einstein, em 1905. No presente

<sup>4</sup>Tal energia se dá na forma de luz e movimento dos núcleos envolvidos.



**Figura 7:** Ciclo de queima e fusão nuclear. Fonte: Super Interessante [16]

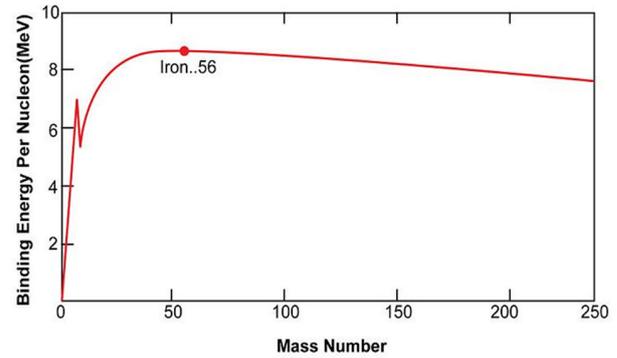
caso, ela nos diz que quando as estrelas obtêm energia, ocorre como consequência a perda de massa. Ou seja, estrelas perdem massa com o tempo.

#### 4 Estrelas variáveis

Estas são estrelas bem características, por variarem seu brilho e tamanho no decorrer do tempo. Tais variações podem ser intrínsecas ou extrínsecas. Intrínsecas são aquelas que acontecem por fenômenos ocorridos na própria estrela, como, por exemplo, uma estrela variando seu brilho por uma compressão e em seguida expansão periódica de sua superfície. Dentre os tipos de intrínsecas, estão as cefeidas, RR Lyrae, RV Tauri, variáveis de longo período e cataclísmicas. Já extrínsecas, são as que ocorrem por variações externas, como um sistema binário, onde há duas estrelas no qual uma acaba ofuscando o brilho da outra por meio de um eclipse. Dentre os tipos de extrínsecas, estão as binárias eclipsantes e as variáveis rotativas.

##### 4.1 Cefeidas e distâncias

Um dos principais tipos de estrelas variáveis são as cefeidas, cuja variação intrínseca de seu bri-

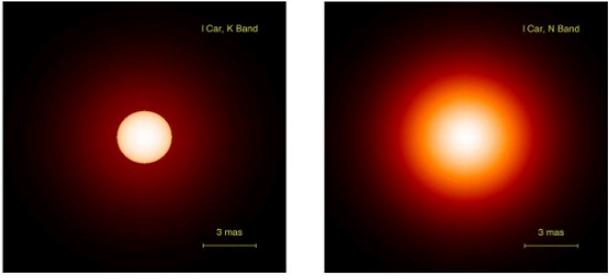


**Figura 8:** Energia de ligação nuclear por partícula constituinte (eixo vertical) em função do número de massa (eixo horizontal) do elemento químico. Note que, a partir do ferro, novos núcleos possuem menor energia de ligação (em módulo) por partícula constituinte. Fonte: clivebest.com [17]

lho e dimensão ocorre periodicamente. Durante o final do século XIX e o início do século XX, havia um grande problema na astronomia: o cálculo limitado de distâncias. Isso se deve ao fato de que, naquela época, o método utilizado para o cálculo de distâncias era o da paralaxe estelar, ou seja, da medição do desvio aparente de uma estrela contra fundo de objetos mais distantes devido ao movimento orbital da Terra. O problema com tal método é que com o aumento da distância da estrela em relação à Terra, menor será sua paralaxe, tornando o método ineficaz para distâncias acima de cerca de 100 parsecs. Um novo método de cálculo desenvolveu-se a partir dos estudos de Henrietta Leavitt sobre as estrelas variáveis. Entre 1903 e 1908, Leavitt descobriu e catalogou 1777 estrelas variáveis situadas nas Grandes e Pequenas Nuvens de Magalhães, percebendo que algumas dessas apresentavam um padrão, no qual estrelas de maior período de oscilação (tempo necessários para a estrela variável sair de um nível mínimo de brilho até o outro) eram também mais brilhantes, como podemos observar na Figura 10.

Em 1912, Leavitt publica a relação precisa, por ela descoberta, entre o período e a luminosidade [19] das cefeidas, fazendo com que este tipo de estrelas variáveis se tornassem as primeiras “velas-padrão” da astronomia.<sup>5</sup> Com esta relação, Hertzsprung determinou, em 1913, a distância até a nuvem de Magalhães e, desde então, as distâncias de estrelas muito mais longes

<sup>5</sup>Uma vela-padrão é basicamente um objeto de luminosidade conhecida. Medindo seu brilho, é possível determinar a que distância ele se encontra – ver eq.(2).



**Figura 9:** Estrela variável fotografada em momentos de menor e maior brilho. Fonte: Super Interessante [18]

foram medidas com este método. Com isso, houve um grande avanço na nossa concepção sobre a dimensão do Universo, sendo notável o trabalho de Edwin Hubble (que entre outros feitos utilizou-se da mesma relação para a determinação da distância de Andrômeda, em 1923) anos mais tarde.

#### 4.2 Experimento sobre curva de luz, Cefeidas e distâncias

Para realizar este experimento, utilizamos o American Association of Variable Star Observers (AAVSO), disponível em [www.aavso.org](http://www.aavso.org), que é uma organização sobre estrelas variáveis que disponibiliza uma ferramenta para a criação de curvas de luz, que são gráficos que apresentam a variação do brilho com o tempo. Extraíndo os dados da curva de luz, é possível calcular a distância da Terra até a cefeida. A cefeida escolhida foi a Delta Cephei ( $\delta$  cep), localizada na constelação de Cefeu. Utilizando o AAVSO, foi gerada a seguinte curva de luz, observada na Figura 11, da qual é possível extrair o período ( $P = 5,4$  dias) e as magnitudes aparente máxima ( $m_{max} = 4,4$  W/m<sup>2</sup>) e mínima ( $m_{min} = 3,4$  W/m<sup>2</sup>) da Delta Cephei. Para calcular a distância, utilizamos as seguintes equações [20],

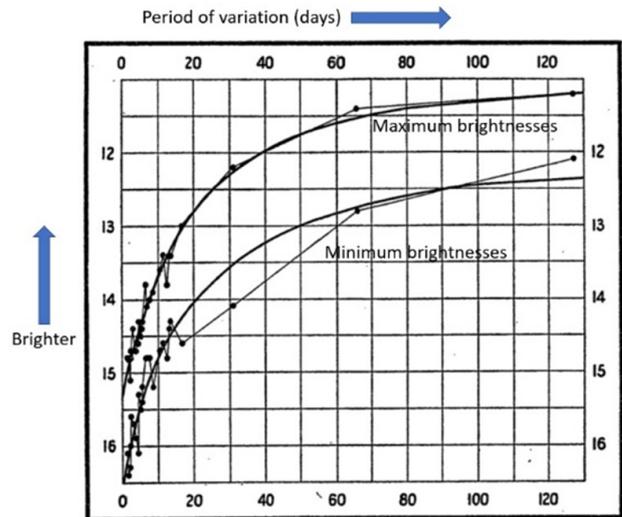
$$M = -2,76 \log(P) - 1,35, \quad (7)$$

sendo  $M$  é a magnitude absoluta da cefeida e  $P$  o seu período;

$$m = \frac{m_{max} + m_{min}}{2}, \quad (8)$$

na qual  $m$  é a magnitude aparente da estrela, com  $m_{max}$  e  $m_{min}$  sendo, respectivamente, suas magnitudes aparente máxima e mínima e, finalmente:

$$d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} \quad (9)$$



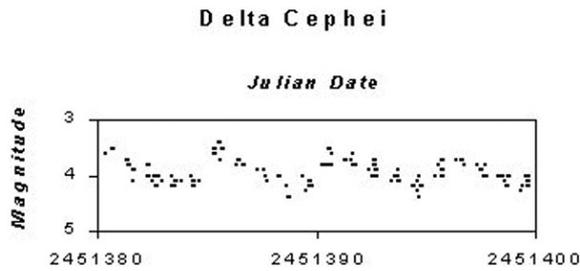
**Figura 10:** Relação entre período (eixo horizontal) e luminosidade (eixo vertical) das cefeidas. Observe que quanto maior é o período, maior será a luminosidade. Fonte: fords.org [22]

em que  $d$  é a distância da Terra à cefeida. O resultado obtido foi de aproximadamente 280 parsecs, ou 913 anos luz. Para verificar o resultado obtido, procuramos em fontes confiáveis a distância da Terra até Delta Cephei, encontrando o valor de  $272 \pm 8$  parsecs =  $887 \pm 26$  anos luz [21]. Com isso, concluímos que o nosso resultado está dentro dos valores aceitos pelas medições atuais.

Para ir um pouco além, decidimos calcular a distância de M31V1, que é uma cefeida da galáxia de Andrômeda. Fazendo o procedimento novamente, geramos a curva de luz e extraímos os seguintes dados:  $P = 31,404$  dias,  $m_{max} = 19,5$  W/m<sup>2</sup> e  $m_{min} = 18,5$  W/m<sup>2</sup>. Seguindo os mesmos cálculos obtivemos:  $d \approx 798590$  parsecs = 2.635.347 anos luz. Verificando o resultado, notamos que a distância real é de  $2,52 \pm 0,14$  milhões de anos luz [23]. Com isso, concluímos que o nosso resultado está dentro dos valores aceitos pelas medições atuais.

### 5 Ciclo de vida

Como nós, as estrelas têm um ciclo de vida. Nascer, crescer e morrer. Nesta seção, iremos ver as diferentes fases de vida das estrelas, desde seu nascimento até sua morte.



**Figura 11:** Curva de luz da Delta Cephei gerada com a utilização do AAVSO. Fonte: [American Association of Variable Star Observers](#)

### 5.1 Nascimento

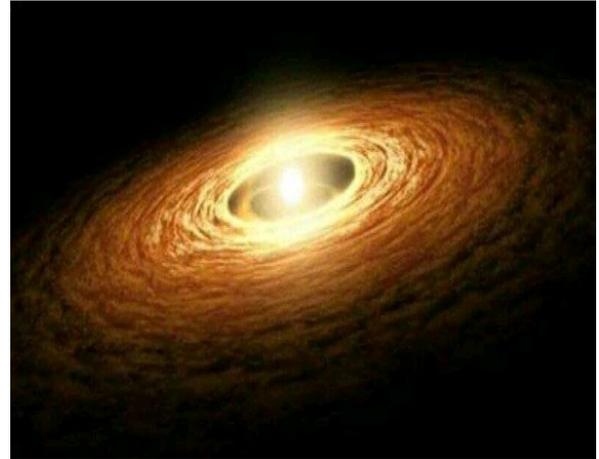
O nascimento das estrelas ocorre nas nebulosas. Nebulosas são nuvens moleculares formadas por poeira, hidrogênio e hélio. Ao passar milhares de anos, os átomos de hidrogênio fundem-se formando uma bola de gás quente chamada protoestrela. Logo depois, ao chegar a uma temperatura de 10 milhões Kelvin, os átomos de hidrogênio iniciam a fusão nuclear, gerando átomos de hélio. Assim formando uma nova estrela.

### 5.2 Morte estelar

Como tudo no universo, há sempre um fim, e essa regra não foge às estrelas. Mas, embora isso signifique o fim daquela estrela, também abre portas para toda uma nova geração. A morte ocorre quando o combustível para a fusão nuclear acaba. Dependendo de várias características atribuídas àquela durante sua vida, sua morte pode ocorrer de variadas formas.

### 5.3 Gigante vermelha

Uma vez acabado seu combustível, a gravidade torna-se maior que a pressão interna dos gases, finalizando o equilíbrio hidrostático e comprimindo o núcleo, aumentando sua densidade. Para continuar estável, ocorre a queima de hidrogênio nas camadas exteriores ao núcleo, o que gera uma grande quantidade de energia e um aumento na pressão interna. Com essa pressão empurrando contra a gravidade, a estrela se expande. Observando novamente a equação (1) da luminosidade, notamos que o aumento do raio estelar fará com que a temperatura diminua e, com uma temperatura menor, o espectro da estrela tenderá ao vermelho [24]. Com um aumento da densidade do núcleo, as condições tornam-se propícias para



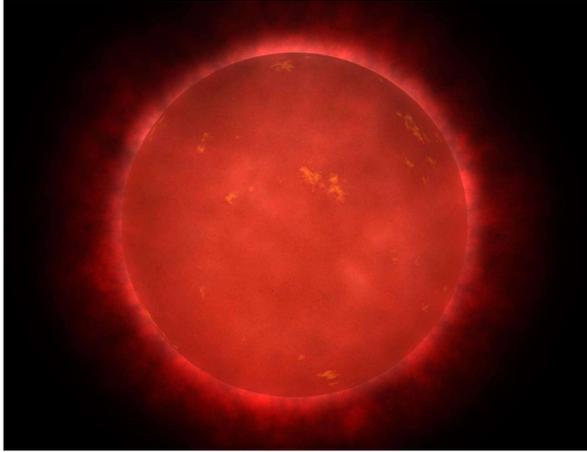
**Figura 12:** Representação artística de uma protoestrela. Fonte: Veja [25]

a fusão do hélio e, após o hélio, inicia-se a fusão de carbono. Após isso, as camadas exteriores irão se colapsar e formar uma nebulosa planetária e, ao centro dessa nebulosa, o antigo núcleo de carbono tornar-se-á uma pequena anã branca.

### 5.4 Anãs brancas

As anãs brancas são remanescentes estelares compostos principalmente por matéria eletronicamente degenerada.<sup>6</sup> Em geral, são estrelas pequenas (Sirius-B, por exemplo, é menor que a Terra), porém de grande densidade. Uma característica importante dessas estrelas é que seus núcleos estão abaixo da temperatura necessária para dar continuidade aos processos de fusão nuclear e, sem a fusão nuclear para gerar energia, a pressão do gás estelar não é suficiente para manter o equilíbrio hidrostático. Desta forma, quando uma gigante vermelha colapsa se tornando uma anã branca, seu núcleo se comprime bastante (o que explica seu pequeno tamanho e sua alta densidade), fazendo com que suas partículas cons-

<sup>6</sup>Para entendermos a degenerescência eletrônica, nos lembremos do princípio de exclusão de Pauli: Um sistema físico qualquer, e em especial um átomo, tende sempre a evoluir naturalmente para estados de menor energia potencial. Desta forma, poderíamos esperar que todos os elétrons em um átomo multieletrônico se aglomerassem em sua camada mais interna, ocupando simultaneamente o estado de mais baixa energia possível para cada um deles individualmente. No entanto, isto não acontece pois, de acordo com o princípio da exclusão de Pauli, dois (ou mais) elétrons não podem ocupar o mesmo estado quântico de um mesmo sistema ao mesmo tempo. Desta forma, eles tendem a se distribuir progressivamente das camadas mais internas para as mais externas.



**Figura 13:** Representação artística de uma gigante vermelha. Fonte: The nine planets [27]

tituintes estejam tão fortemente agregadas ao ponto dos estados quânticos de seus elétrons começarem a se sobrepor. É nesse ponto que a degenerescência eletrônica se torna fundamental para evitar o colapso da estrela [26]. De maneira análoga ao que acontece em um átomo multieletrônico, o princípio da exclusão irá impedir que os elétrons ocupem o mesmo estado e, consequentemente, se aglomerem ainda mais. Como consequência, isso gerará uma espécie de pressão, a chamada pressão de degenerescência, que, no caso das anãs brancas, será suficiente para equilibrar a gravidade e manter a estrela em equilíbrio por um longo período de tempo.

Apesar de possuírem uma longa vida, ela tem um fim, que pode acontecer de três formas. Uma das formas acontece quando há um sistema binário com uma das estrelas sendo uma anã branca. Quando, por exemplo, a outra estrela torna-se uma gigante vermelha, sua matéria, sendo ela principalmente hidrogênio, é capturada pela anã branca e, com isso, acontece a fusão nuclear na anã branca. Quando sua massa chega a  $1,3 M_{\odot}$ , começa a queima de carbono e depois a de ferro. Quando metade do carbono torna-se ferro, a anã branca explode em uma explosão extremamente luminosa e rica em silício, conhecida como supernova Ia [28]. Outra forma seria ela se esfriar formando uma anã negra. Porém, teoricamente levariam trilhões de anos para que isso acontecesse, sendo o Universo ainda muito jovem para que isso já possa ter acontecido (o Universo tem cerca de 13,7 bilhões de anos, o que é muito menos que o tempo que uma anã branca levaria para se resfriar). A matéria degenerada possui um li-

mite, chamado de limite de Chandrasekhar [26]. Quando uma estrela atinge esse limite, que vale  $1,4 M_{\odot}$ , ela se tornará, após uma supernova, uma estrela de nêutrons ou um buraco negro, dependendo de sua massa.

### 5.5 Supernovas

Na seção anterior, falamos sobre a supernova do tipo Ia. Porém, existem também outros tipos de supernova. Quando uma estrela supergigante possui cerca de  $10 M_{\odot}$  e seu combustível acaba, a gravidade ganha da pressão interna. Sendo assim, o equilíbrio hidrostático não é mais mantido e a estrela colapsa. Em seguida, ocorre uma explosão denominada supernova tipo II, sendo esse tipo de supernova caracterizado por apresentar hidrogênio e hélio em seu espectro. Também há os tipos Ib e Ic de supernovas, ambos sendo colapsos do núcleo estelar. O tipo Ib possui somente hélio em seu espectro e o tipo Ic não possui nem hidrogênio e nem hélio.

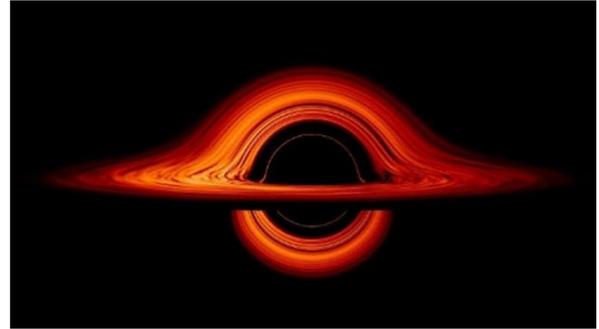
### 5.6 Estrelas de nêutrons e pulsares

Quando o núcleo da supernova possuir menos que  $3 M_{\odot}$ , forma-se uma estrela de nêutrons, que recebe este nome porque, dentro de seu núcleo, os átomos estão tão próximos que os prótons e elétrons combinam-se em nêutrons. Essas estrelas giram muito rápido, sendo que a velocidade dessa rotação depende da matéria que foi atraída do remanescente da supernova. De acordo com o princípio da conservação do momento angular: quanto mais a matéria estiver contraída, mais rápido será o giro [29].<sup>7</sup> Um tipo interessante de estrela de nêutrons é o pulsar. Um pulsar é uma estrela de nêutrons com uma enorme rotação e um intenso campo magnético, que emite energia em feixes estreitos de radiação eletromagnética ao longo de seus polos (ver Figura 14). Uma vez que tais feixes são estreitos, apenas observadores que estejam em sua direção poderão detectá-los e, uma vez que o pulsar está a girar, eles o enxergarão como pulsos extremamente regulares e de curta duração, num efeito semelhante à luz que se observa vinda de um farol.

<sup>7</sup>Como uma analogia, pensemos na conservação do momento angular durante o giro de uma bailarina: quando gira com os braços abertos, sua velocidade é menor, pois a matéria (distribuída ao longo de seus braços) está dispersa, mas se contrair os braços, a velocidade aumenta



**Figura 14:** Representação artística de um pulsar. Fonte: iStock [30]



**Figura 15:** Visualização de um buraco negro feita pela NASA. Fonte: BBC News Brasil [31]

### 5.7 Buracos negros

Caso o núcleo estelar possuir mais que  $3 M_{\odot}$ , após a supernova, a gravidade será tão intensa que irá comprimir toda matéria em um único ponto, chamado de singularidade [31]. Com isso, é formado um buraco negro. Buracos negros recebem este nome pois ao seu redor há um limite, chamado horizonte de eventos, da qual nada que o penetre pode escapar, nem mesmo a luz.

## 6 Conclusão

Ao final deste artigo, esperamos ter feito uma breve revisão bibliográfica sobre as estrelas e, com isso, tê-lo instigado sobre esse grande universo repleto de pontinhos que o iluminam desde seu início. Ao longo dele, discutimos as principais propriedades e o mecanismo que as mantém, ao menos temporariamente, em equilíbrio. Vimos também que as estrelas podem ser bem diferentes umas das outras – como as cefeidas, anãs brancas, gigantes vermelhas, estrelas de nêutrons etc – e que possuem um ciclo de vida. Estrelas são a luz do universo, e a vida depende dessa luz.

### Sobre os autores

Carlos Daniel Caldeira Silva ([carlosdaniel231106@gmail.com](mailto:carlosdaniel231106@gmail.com)) é aluno da primeira série do curso Técnico em Agropecuária integrado ao ensino médio, do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), campus Alegre.

Victor Hugo Nantet Binoti ([victorbinoti42@gmail.com](mailto:victorbinoti42@gmail.com)) é aluno da primeira série do curso Técnico em Agropecuária integrado ao ensino médio, do Instituto Federal do Espírito

Santo (Ifes), campus Alegre.

Bernardo Brunoro Dilem ([bernardob@ifes.edu.br](mailto:bernardob@ifes.edu.br)) é bacharel em física pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), possui mestrado e doutorado em física pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e é professor de física do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), campus Alegre.

### Referências

- [1] S. Rocha, *Composição química da matéria*, Simbiotica.org. Disponível em <http://www.simbiotica.org/composicaoquimicacelula.htm>, acesso em fev. 2023.
- [2] K. M. Delmestre, *Somos poeira de estrelas*, Instituto Serrapilheira (2020). Disponível em <https://serrapilheira.org/somos-poeira-de-estrelas/>, acesso em fev. 2023.
- [3] L. Arany-Prado, *À luz das estrelas* (DP&A Editora, Rio de Janeiro, 2006).
- [4] G. Hirata, *Como os cientistas descobrem as características de uma estrela?*, Super Interessante (2018). Disponível em <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-os-cientistas-descobrem-as-caracteristicas-de-uma-estrela>, acesso em fev. 2023.
- [5] P. Gister, *In praise of the k-class stars*, Centauri Dream (2009). Disponível em <https://www.centauri-dreams.org/2009/08/12/in-praise-of-k-class-stars/>, acesso em fev. 2023.

- [6] U. C. Taylor, *Astronomy through the eyes of the ancients*, Journal of the Royal Astronomical Society of Canada **25**, 55 (1931).
- [7] *Qual a diferença entre brilho e luminosidade*, Treinamento24. Disponível em <https://treinamento24.com/library/lecture/read/804431-qual-a-diferenca-entre-brilho-e-luminosidade>, acesso em fev. 2023.
- [8] A. Posses, D. Mello e G. Ponte, *Qual o futuro do Sol?*, Revista Galileu | Espaço (2019). Disponível em <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/Espaco/noticia/2019/12/qual-o-futuro-do-sol.html>, acesso em fev. 2023.
- [9] B. Leiroz, *Conheça a Stephenson 2-18, a estrela que superou a UY Scuti*, Conexão Geoclima (2020). Disponível em <https://www.conexaogeoclima.com.br/post/conhe%C3%A7a-a-stephenson-2-18>, acesso em fev. 2023.
- [10] Astronomiaum, *Stephenson 2-18 é uma estrela supergigante vermelha localizada na constelação de scutum. também catalogada como stephenson 2-dfk 1 e rsgc2-18, é a atual detentora do recorde da maior estrela conhecida, com um raio de 2.150 vezes o do sol.*, 10 abr. 2022. 22:40 Twitter: @astronomiaum. Disponível em <https://twitter.com/astromiaum/status/1513331205147668481>, acesso em fev. 2023.
- [11] M. Luciuk, *The HR diagram, the most famous diagram in astronomy*, Asterism.org (2019). Disponível em <https://asterism.org/wp-content/uploads/2019/03/tut39-HR-Diagram.pdf>, acesso em fev. 2023.
- [12] K. S. Oliveira Filho e M. F. O. Saraiva, *O diagrama HR*, Astronomia e Astrofísica (2022). Disponível em <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node2.htm>, acesso em fev. 2023.
- [13] *O sol*, Instituto Geofísico, Universidade de Coimbra. Disponível em <http://www1.ci.uc.pt/iguc/atlas/02sol.htm>, acesso em fev. 2023.
- [14] P. Guitarrara, *Sol*, Mundo Educação. Disponível em <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/o-sol.htm>, acesso em fev. 2023.
- [15] W. F. Silva, *Origem, evolução e morte das estrelas: uma sequência de ensino para alunos do ensino médio*, Doc Player. Disponível em <https://docplayer.com.br/113206870-Origem-evolucao-e-morte-das-estrelas-uma-sequencia-de-ensino-para-alunos-do-ensino-medio.html>, acesso em fev. 2023.
- [16] B. Vaiano, *A fantástica fábrica de elementos pesados*, Super Interessante (2018). Disponível em <https://super.abril.com.br/ciencia/a-fantastica-fabrica-de-elementos-pesados/amp/>, acesso em fev. 2023.
- [17] C. Best, *Nuclear fusion - part 1*, clivebest.com (2015). Disponível em <https://clivebest.com/blog/?p=6899>, acesso em fev. 2023.
- [18] J. Soares, *5 tipos fantásticos de estrelas*, Super Interessante (2013). Disponível em <https://super.abril.com.br/coluna/superlistas/5-tipos-fantasticos-de-estrelas/amp/>, acesso em fev. 2023.
- [19] A. Masley, *Cepheid variable stars - IB Physics*, Andy Masley's IB Physics lectures (2020). Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=6F-B1rLZUnA>, acesso em fev. 2023.
- [20] *Science & technology - stellar distances*, European Space Agency (2022). Disponível em <https://sci.esa.int/web/education/-/35616-stellar-distances>, acesso em fev. 2023.
- [21] *Delta cephei*, Wikipedia. Disponível em [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Delta\\_Cephei](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Delta_Cephei), acesso em fev. 2023.
- [22] O. Wilson, *Solving the unknown: What astronomer Henrietta Swan Leavitt accomplished*, fords.org (2020). Disponível em [Cadernos de Astronomia, vol. 4, n°1, 143-155 \(2023\)](https://fords.org/solving-the-unknown-what-astronomer-henrietta-</a></p></div><div data-bbox=)

- [swan-leavitt-accomplished/](#), acesso em fev. 2023.
- [23] *Andromeda galaxy*, Wikipedia. Disponível em [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Andromeda\\_Galaxy](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Andromeda_Galaxy), acesso em fev. 2023.
- [24] F. Cain, *Why do red giants expand?*, Universe Today (2015). Disponível em <https://www.universetoday.com/122807/why-do-red-giants-expand/>, acesso em fev. 2023.
- [25] *Novo modelo explica como os planetas se formaram*, Veja (2012). Disponível em <https://veja.abril.com.br/ciencia/novo-modelo-explica-como-os-planetras-se-formaram/>, acesso em fev. 2023.
- [26] B. P. Hosti, *O que é matéria degenerada e o limite de chandrasekhar*, Espaço tempo (2022). Disponível em <https://www.espacotempo.com.br/materia-degenerada-limite-de-chandrasekhar/>, acesso em fev. 2023.
- [27] *Red giant star facts*, The nine planets (2020). Disponível em <https://nineplanets.org/red-giant-star/>, acesso em fev. 2023.
- [28] C. Mihos, *White dwarfs, Novae and type Ia Supernovae*, burro.case.edu. Disponível em <http://burro.case.edu/Academics/Astr221/LifeCycle/WNovae.html>.
- [29] R. A. Martins, *O Universo* (Livraria da Física, 2012).
- [30] A. Plawgo, *Banco de imagens e fotos de pulsar star*, iStock (2021). Disponível em <https://www.istockphoto.com/br/fotos/pulsar-star>, acesso em fev. 2023.
- [31] L. Lima, *O que é a singularidade, o coração dos buracos negros onde todas leis da natureza são quebradas*, BBC News Brasil (2020). Disponível em <https://www.bbc.com/portuguese/geral-54462160>, acesso em fev. 2023.