

O Céu Noturno é Realmente Escuro?

Is the Night Sky Really Dark?

Jeremias Bezerra Sobrinho^{*1}, João Rodrigo Souza Leão²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Física Teórica e Experimental, Natal, RN, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Escola de Ciências e Tecnologia, Natal, RN, Brasil.

Recebido em 31 de maio de 2023. Revisado em 26 de junho de 2023. Aceito em 27 de junho de 2023.

Em 1823, o astrônomo alemão Henrich Wilhelm Olbers formulou uma questão teórica a respeito da escuridão do céu noturno. Supondo que vivíamos em um universo infinito, permeado por infinitas estrelas, Olbers ponderou como a noite poderia ser escura. Modernamente esta questão é conhecida como o Paradoxo de Olbers. Múltiplas explicações já foram oferecidas desde sua formulação, sendo que algumas das explicações já não são mais válidas ou estão incompletas. Somente à luz das teorias mais recentes e das observações astronômicas do século XX é que o aparente paradoxo pôde ser resolvido. O presente artigo tem por objetivo elencar as evidências observacionais mais relevantes que ajudam a esclarecer o Paradoxo de Olbers. Ao abordar as últimas descobertas da astronomia e da física teórica, buscaremos apresentar um panorama completo sobre as razões pelas quais o céu noturno é mais claro e rico em radiação do que inicialmente se supunha.

Palavras-chave: Astrofísica, Céu, Expansão do Universo, Paradoxo de Olbers.

In 1823 German astronomer Henrich Wilhelm Olbers formulated a theoretical question regarding the darkness of the night sky. Assuming an infinite universe, permeated by infinite stars, Olbers pondered on how could the night sky be dark. Modernly this question is known as the Olbers Paradox. Multiple explanations have been offered since its formulation, and some of the explanations are no longer valid or are incomplete. Only in the light of the most recent theories and astronomical observations of the 20th century can this apparent paradox be resolved. The objective of this article is to list the most relevant observational evidence that helps to clarify Olbers' Paradox. By addressing the latest discoveries in astronomy and theoretical physics, we seek to provide a comprehensive overview of the reasons why the night sky is brighter and richer in radiation than initially supposed.

Keywords: Astrophysics, Sky, Expansion of the universe, Olbers' paradox.

1. Introdução

O astrônomo alemão Henrich Olbers (1758–1840) é conhecido pela elaboração de um novo método para a determinação das órbitas de cometas, por ter se tornado Membro da Royal Society de Londres (1804) e pela descoberta de dois dos maiores asteroides de nosso sistema solar: Pallas (1802) e Vesta (1807) [1]. Contudo, Olbers é ainda mais conhecido pela inquietante pergunta: “Por que a noite é escura?”. Esta questão aparentemente trivial, tem importantes implicações para o nosso entendimento a respeito do universo.

Podemos reformular a pergunta de Olbers se soubermos as hipóteses nas quais ela se baseia: (i) o universo é infinito; (ii) existem infinitas estrelas. Se estas duas hipóteses são verdadeiras, por que o céu noturno é escuro? Não deveria ser o oposto? Infinitas estrelas em um universo infinito não deveriam gerar um brilho também infinito? Um universo infinito em todas as direções, permeado por infinitas estrelas não deveria

estar coberto de fótons e de luminosidade proveniente das infinitas estrelas?

Entretanto, como podemos facilmente comprovar pela simples observação, o céu noturno não é completamente luminoso. O que vemos na verdade é o brilho discreto de alguns milhares de estrelas que podemos ver sem o auxílio de telescópios [2]. Pelo menos a olho nu, estas estrelas apresentam uma separação espacial e, portanto, não vemos um contínuo de estrelas, apesar de sabermos que existem bilhões de estrelas em nossa galáxia e bilhões de galáxias no universo [3].

Assim, as hipóteses de Olbers levaram a uma conclusão que não foi corroborada pelas observações, gerando um aparente paradoxo. No entanto, a solução desse paradoxo envolve muitos aspectos da astrofísica moderna. Antes de oferecer a solução para o aparente paradoxo, é importante entender o contexto no qual a pergunta de Olbers foi formulada, incluindo as teorias físicas e instrumentos científicos disponíveis para ele na época. Compreender esse contexto é fundamental para avaliar como Olbers chegou às suas conclusões e como elas foram influenciadas pelas limitações do conhecimento e das tecnologias disponíveis na época.

*Endereço de correspondência: jeremias.bs@gmail.com

No século XV, a astronomia passou por uma profunda mudança, proposta por Nicolau Copérnico (1473–1543), que estabeleceu que a Terra e os planetas se movem em torno do Sol, e que as estrelas estão fixas em esferas que envolvem o sistema solar. Essas esferas celestes seriam como uma série de círculos concêntricos, imaginários, que rodeariam a Terra, cada uma delas correspondendo a um planeta ou a um grupo de estrelas. Copérnico acreditava que as esferas celestes eram responsáveis por mover os planetas em suas órbitas e manter as estrelas em suas posições fixas no céu [4–7].

Aproximadamente um século depois, XVI, o astrônomo inglês Thomas Digges (1546–1595) difundiu as ideias do sistema heliocêntrico de Copérnico na Inglaterra, traduzindo-as para o inglês e divulgando-as para o público em geral. Uma das contribuições mais importantes de Digges para a história da astronomia foi a destruição da esfera das estrelas fixas. Ele argumentou que as estrelas não podiam estar todas localizadas em uma esfera fixa ao redor da Terra, como se acreditava na época, mas deveriam estar espalhadas pelo espaço infinito. Isso levantou uma questão interessante: se as estrelas estão espalhadas por todo o espaço, por que o céu noturno é escuro? [8–11].

De fato, foi Digges quem elaborou o problema da escuridão do céu noturno, entretanto, ele não percebeu nada paradoxal. A concepção do paradoxo em questão foi objeto de discussão por diversos cientistas e filósofos em tempos anteriores à Johann Heinrich Olbers, entretanto, foi este último quem o formulou matematicamente de forma rigorosa em 1826, o que o tornou mais difundido entre o público em geral e, conseqüentemente, foi-lhe atribuída a denominação em questão.

2. O Suposto Paradoxo

Nesta seção, com a finalidade de compreender o aparente paradoxo sob um enfoque matemático, concebemos um modelo que representa o universo tal qual era aceito pelos físicos e astrônomos da época de Olbers: homogêneo, imutável, estático, infinito em extensão e dotado de uma quantidade ilimitada de estrelas [12, 13]. Para isso, vamos pensar em uma casca esférica cheia de estrelas, de raio r e espessura dr , centrada na Terra, como mostra a Figura 1. Vamos calcular o fluxo luminoso devido à esta distribuição. O primeiro passo consiste em relacionar a luminosidade aparente de uma estrela com sua distância da Terra. Essa relação é descrita pela lei do inverso do quadrado da distância, que estabelece que a luminosidade aparente é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a estrela e o observador [14]. Matematicamente, essa lei pode ser expressa pela lei do inverso do quadrado:

$$f(r) = \frac{L}{4\pi r^2} \quad (1)$$

onde f é a luminosidade aparente da estrela (medida, na astronomia em ergs/s/m^2), L é a luminosidade intrínseca

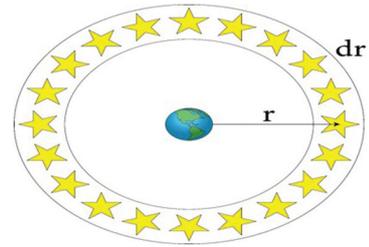


Figura 1: Representação, fora de escala, de uma casca esférica centrada na Terra.

da estrela (medida em ergs/s) e r é a distância da estrela ao observador na Terra (medida em metros). Pela equação (1) é possível perceber que a luminosidade aparente de uma estrela diminui à medida que sua distância da Terra aumenta. Isso significa que, se uma estrela é duas vezes mais distante da Terra, sua luminosidade aparente é quatro vezes menor. Da mesma forma, se uma estrela é três vezes mais distante, sua luminosidade aparente é nove vezes menor, e assim por diante.

Para a obtenção do número de estrelas (n) na casca esférica, é necessário calcular o produto entre o volume da casca ($4\pi r^2 dr$) e a densidade numérica média de estrelas (δ). Esse cálculo permitirá obter uma estimativa do número de estrelas presentes na região em análise. Matematicamente, temos:

$$n(r) = 4\pi r^2 \delta dr \quad (2)$$

dessa forma, o fluxo luminoso da casca esférica (φ) sobre a Terra será o produto do fluxo de cada estrela com o número de estrelas presentes na distribuição:

$$\varphi = f(r)n(r) = L\delta dr \quad (3)$$

Com isso realizado, podemos calcular o fluxo emitido por todo o universo (Φ) se fizermos o raio dessa casca tender ao infinito. Para isso é preciso integrar dr desde $d = 0$ até $d = \infty$ (considerando um universo infinito):

$$\Phi = \int_0^{\infty} L\delta dr \quad (4)$$

Perceba que a luminosidade estelar média e densidade numérica média de estrelas no universo são constantes em relação ao raio do universo.

$$\Phi = L\delta \int_0^{\infty} dr = \infty \quad (5)$$

Chegamos à conclusão que o fluxo total devido às infinitas estrelas do universo, é infinito. Essa conclusão contradiz completamente as observações que fazemos do céu noturno.

3. As Tentativas de Solução

Acredita-se que a primeira tentativa de solução da escuridão do céu noturno veio no século XVI pouco

após o questionamento de Digges. O responsável por isso foi o grande astrônomo Johannes Kepler (1571–1630), conhecido por suas leis do movimento planetário. Em sua obra “Mysterium Cosmographicum”, Kepler propôs que o universo tinha um tamanho finito e uma idade finita, com uma distribuição desigual de estrelas que gerava áreas com pouca intensidade luminosa [15, 16]. No entanto, essa proposta não foi aceita pela comunidade científica da época, que ainda estava fortemente influenciada pela visão aristotélica de um universo eterno e infinito e que seria reforçada por Isaac Newton (1643–1727).

Em sua obra “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”, publicada em 1687, Newton argumentou que, se o universo fosse finito, seria preciso que houvesse uma fronteira, uma espécie de parede, que resultaria em um limite para a distribuição de estrelas [17, 18]. Isso implicaria em uma mudança abrupta na densidade dos corpos celestes, ou seja, em um determinado ponto, a densidade de estrelas seria significativamente menor do que em outras regiões do universo. Essa mudança abrupta na densidade seria difícil de explicar, pois isso implicaria em uma descontinuidade no comportamento gravitacional do universo, contradizendo suas próprias leis da gravitação universal.

Já a solução mais conhecida para o paradoxo da escuridão do céu noturno foi apresentada por Olbers em 1826, que sugeriu que a luz das estrelas mais distantes poderia estar sendo obscurecida/absorvida pela matéria interestelar [19]. Isso ocorre porque a radiação eletromagnética proveniente de estrelas distantes se propaga pelo espaço e interage com a poeira cósmica. Por sua vez, as partículas dessa poeira absorvem e dispersam parte da luz, resultando em uma redução da sua intensidade e uma alteração da sua direção, o que poderia ajudar a explicar por que o céu noturno não é tão brilhante quanto sugeria o aparente paradoxo.

No entanto, cinco anos após a proposição de Olbers, John Frederick William Herschel (1792–1871) demonstrou que a matéria interestelar atingiria o equilíbrio térmico devido à radiação luminosa das estrelas. Esse equilíbrio é alcançado quando a quantidade de energia absorvida pela poeira é igual à energia emitida. Em outras palavras, a temperatura da matéria interestelar se estabiliza em um valor que equilibra a energia absorvida e emitida. Quando esse equilíbrio é atingido, a matéria começa a emitir tanta luz quanto as estrelas, invalidando a justificativa de Olbers [20]. Diante do impasse destas conclusões contraditórias, outras hipóteses teriam que ser consideradas para explicar a escuridão do céu noturno.

Curiosamente, uma reflexão plausível para o aparente paradoxo, veio, inusitadamente, através de um poema em prosa intitulado Eureka (1848), escrito por Edgar Allan Poe (1809–1849). Este poema se baseia na ideia de que a luz das estrelas distantes não teve tempo de nos alcançar [21]. Mesmo não sendo um cientista, Poe

abordou uma questão muito importante que anos depois seria conhecida como a limitação da velocidade da luz:

“Se a sucessão de estrelas fosse interminável, o fundo do céu nos apresentaria uma luminosidade uniforme, como a exibida pelas galáxias. [...] Se isso realmente acontecesse, poderíamos compreender os vazios que nossos telescópios encontram em inúmeras direções, supondo que a distância do fundo invisível seria tão imensa que nenhum raio de luz teve tempo de chegar até nós.”

[21, p. 100 – tradução nossa]

Em 1901 William Thomson (1824–1907), também conhecido como Lord Kelvin, ofereceu uma resposta quantitativa ao problema argumentando que se o universo fosse infinito e homogêneo, então todas as linhas de visão do observador eventualmente encontrariam uma estrela, tornando o céu noturno tão brilhante quanto o Sol. No entanto, o céu noturno é escuro, com apenas algumas estrelas visíveis a olho nu. Kelvin chegou à conclusão de que a escuridão do céu noturno poderia ser explicada pela não homogeneidade do universo e pela absorção de luz pelo meio interestelar, incluindo poeira e gás. Ele argumentou que a distribuição da matéria no universo pode ser desigual, com áreas onde a densidade de matéria é menor e com menos estrelas. Isso resultaria em uma diminuição da quantidade de luz vinda dessas regiões distantes, o que contribuiria para a escuridão do céu noturno [22, 23].

4. A Solução Moderna

A fim de obtermos uma resposta definitiva para o Paradoxo de Olbers, é importante lembrar que uma das etapas fundamentais do método científico é formular hipóteses e testá-las para verificar se são falseáveis ou não. Considerando as contradições presentes, é crucial que revisemos as hipóteses que sustentam o paradoxo, a fim de alcançarmos uma solução coerente. Por um lado, o aparente paradoxo estava sustentado na ideia de que as estrelas existem e emitem luz por um tempo infinito. Por outro, pressupõe que o universo observável é infinito.

A finitude das estrelas é um dos retumbantes resultados da moderna teoria da evolução estelar que mostra que as estrelas não são esferas gasosas que emitem luz indefinidamente. Na verdade, as estrelas queimam seus combustíveis nucleares por um tempo finito. As estrelas como o Sol e até algumas ainda mais massivas, passam boa parte de suas vidas transformando Hidrogênio em Hélio e gerando energia luminosa por um tempo que pode levar dezenas de bilhões de anos [24]. Por outro lado, as estrelas de alta massa ($M_{INICIAL} > 8M_{\odot}$) tem uma evolução acelerada e extinguem o material nuclear muito mais rapidamente, tendo um tempo de vida de apenas alguns milhões de anos [24]. Seja como for, as

estrelas possuem um tempo de vida finito. Ou seja, o brilho infinito das estrelas foi refutado pela moderna teoria da evolução estelar e observações detalhadas e precisas feitas ao longo do século XX e até os dias de hoje.

A ideia de que o universo é infinito foi refutada graças ao trabalho pioneiro de Edwin Powell Hubble (1889–1953) e outros pesquisadores subsequentes, que demonstraram que o universo observável é finito e que sua idade pode ser estimada usando a constante de Hubble [25]. Foi o trabalho observacional de Hubble, em 1929, que mostrou que a distância às galáxias está relacionada às suas velocidades de afastamento através de uma relação linear, sugerindo que em um passado remoto toda a matéria do universo estava concentrada em um único ponto. As observações de Hubble e os resultados teóricos de Alexander Friedmann (1888–1925) e Georges Lemaître (1894–1966) nos levam à conclusão moderna – e atualmente mais aceita – que o universo de fato teve um início e que, portanto, tem uma idade finita. Isso implica que o universo observável não é infinito como Olbers e outros pesquisadores assumiram.

O entendimento atual é que houve um momento em que toda a matéria do universo estava concentrada em um único ponto, uma singularidade, com densidade infinita. A partir deste ponto começou uma grande expansão do universo e do espaço-tempo. A expansão do universo, segundo as evidências observacionais de galáxias e da radiação cósmica de fundo, mostra que o universo passou por diversas fases:

- (i) Era inflacionária: uma época inflacionária marcada por uma evolução quase exponencial do universo. Nesse período ocorreu a geração das perturbações iniciais que são responsáveis pela origem das estruturas em larga escala do universo durante a fase (iii);
- (ii) Era da radiação: após o período de inflação, o universo entrou em uma fase dominada pela radiação. Durante essa etapa, a densidade de matéria era extremamente alta e as partículas estavam altamente energéticas e se moviam rapidamente, interagindo constantemente entre si. O acoplamento dessas partículas, principalmente fótons e bárions, era tão forte que elas se comportavam como um único fluido. À medida que o universo se expandia e esfriava, os fótons e bárions se desacoplaram e a radiação começou a perder sua influência relativa sobre a evolução do universo;
- (iii) Era da matéria: com o resfriamento contínuo do universo, chegou uma época em que a matéria começou a dominar a evolução cósmica. Durante essa era, as flutuações de densidade da matéria começaram a se agrupar e formar estruturas maiores, como galáxias e os aglomerados de galáxias;
- (iv) Era da energia escura: a era atual é caracterizada pelo domínio da constante cosmológica. Essa era é marcada por uma taxa de expansão cósmica

acelerada, o que significa que as galáxias estão se afastando umas das outras cada vez mais rapidamente com o tempo.

Esse entendimento observacional e teórico a respeito da origem e evolução do universo recebe o nome de Teoria do Big Bang. Existem muitos mais detalhes em cada uma das fases do Big Bang, mas a conclusão que nos interessa é que o universo teve uma origem e possui uma idade finita e possui, portanto, um limite observacional.

Como a relação entre a distância e a velocidade de afastamento das galáxias é dada por uma relação linear, as observações podem facilmente estimar o valor da constante de proporcionalidade da relação – a chamada constante de Hubble. A determinação precisa do valor dessa constante tem sido objeto de muitos estudos e diferentes métodos observacionais [26, 27]. Técnicas que empregam supernovas do tipo Ia, lentes gravitacionais e a radiação cósmica de fundo, produzem valores ligeiramente diferentes para a constante de Hubble. Essas diferenças podem ser causadas por uma variedade de fatores, como limitações nos instrumentos de medição, incertezas nas distâncias das galáxias, incertezas na calibração de fluxos estelares e nos filtros de cores, modelos teóricos imperfeitos ou uma combinação de todos esses fatores. Como resultado, o valor preciso da constante de Hubble e a idade exata do Universo ainda é um problema em aberto na cosmologia moderna [28, 29].

A determinação da idade do universo pode ser obtida por meio da inversão do valor da constante de Hubble, que tem unidades de 1/tempo. Para garantir a correta conversão das unidades é necessário ter cuidado ao realizar essa operação:

$$t_{Universo} = \frac{1}{H_0} \quad (6)$$

Por exemplo, se utilizarmos o valor derivado de Supernovas Ia $(H_0 = 73,4 \frac{km}{Mpc.s})$, obtemos uma idade aproximada de 13,4 bilhões de anos [30]. Mas se usarmos o valor fornecido pelas medições da radiação cósmica de fundo $(H_0 = 67,3 \frac{km}{Mpc.s})$, encontramos uma idade próxima de 13,8 bilhões de anos [31].

Contudo, independentemente do valor utilizado para a constante de Hubble, temos que o universo observável é finito no tempo e no espaço. Essas características levam a duas implicações principais: (i) se o universo observável teve um início, então a luz emitida pelas estrelas mais distantes ainda não teve tempo suficiente para chegar até nós, devido à limitação da velocidade da luz [32]; (ii) se vivemos em um universo finito, isso implica que não pode haver um número infinito de estrelas observáveis. Sendo assim, a astrofísica moderna e a cosmologia observacional desconstróem os pilares fundamentais do aparente paradoxo de Olbers.

A expansão do universo afeta ainda a luz das estrelas, pois observa-se um desvio para o vermelho, conhecido como redshift, devido ao aumento no comprimento de

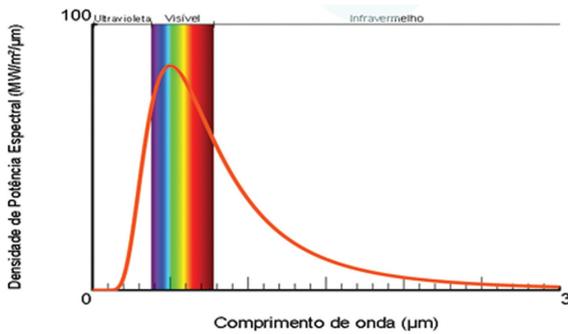


Figura 2: Radiação de corpo negro emitida pelo sol (temperatura de 5800K).

onda da radiação. Esse desvio faz com que a faixa do ultravioleta se desloque em direção ao ótico e a faixa do visível se desloque em direção ao infravermelho¹. De fato, todo o espectro luminoso é deslocado.

O espectro de radiação de uma estrela geralmente tem um pico na faixa do visível, o que significa que a maior parte da energia radiante total da estrela é emitida nessa faixa, como mostrado na Figura 2. Os espectros estelares se assemelham ao espectro da radiação de corpo negro e o comprimento de onda correspondente ao pico de emissão radiante se relaciona à temperatura superficial da estrela através da lei de Wien. Sobreposto ao contínuo da radiação estão as inúmeras linhas de absorção correspondentes aos elementos químicos presentes nas estrelas. As linhas de absorção não são mostradas na Figura 2 que é apenas esquemática.

Devido à expansão do universo, grande parte da radiação originalmente do ótico é deslocada na direção do infravermelho. O deslocamento observado é proporcional à distância, fazendo com que a luz das estrelas e das galáxias sejam deslocadas para comprimentos de onda maiores. Ou seja: a expansão do universo modifica a forma como percebemos e observamos a luz [33, 34].

Este fato era desconhecido por Olbers que podia fazer apenas observações no ótico e jamais poderia supor, imaginar e muito menos observar em outros comprimentos de onda. Este fato também foi crucial para o surgimento do aparente paradoxo. Curiosamente, embora Olbers não soubesse, o universo era de fato muito luminoso e rico em radiação, mas Olbers não tinha como sondar esta radiação no século XIX. Na próxima seção mostraremos como podemos estimar a verdadeira luminosidade do universo.

5. Um Universo Rico em Radiação

Agora que sabemos que o universo não possui uma luminosidade infinita como descrito por Olbers, podemos

¹ O efeito Doppler da luz pode também causar desvio para o azul, ligado ao movimento de aproximação relativo entre galáxias próximas. Entretanto, o universo em larga escala exibe um movimento de afastamento das galáxias, causando o efeito que chamamos de redshift.

retomar o raciocínio do cálculo feito anteriormente. Para isso, precisamos obter o brilho superficial do céu que é resultado de diversos componentes: brilho da atmosfera, a luz zodiacal, a luz difusa da Galáxia e pela luminosidade de fundo extragaláctica. Dessa forma, para computar o brilho superficial do céu temos que integrar todas as fontes luminosas (dN) multiplicada pelo fluxo luminoso (F) de cada uma delas:

$$F_{VIS} = \int_0^{\infty} F \cdot dN \approx 3,2 \cdot 10^{-2} \frac{\mu J}{s \cdot m^2} \quad (7)$$

Essa integral não é trivial e foge do foco deste artigo, para mais detalhes consultar [35]. O valor encontrado é extremamente pequeno e nos mostra o motivo do nosso céu noturno não ser rico em radiação luminosa na faixa do visível, mesmo considerando outras fontes não estelares, conforme o cálculo acima leva em conta. Repare que esse valor é apenas da radiação capaz de ser detectada pelo olho humano e não leva em conta nada além do espectro visível. Ou seja, estamos deixando de lado comprimentos de onda menores que 400 nanômetros e maiores de 750 nanômetros [36].

Dessa forma, se olharmos o céu noturno com um telescópio óptico tradicional, veremos as estrelas e vastas regiões escuras, que não emitem radiação ótica. No entanto, se utilizarmos um radiotelescópio muito sensível na faixa do micro-ondas, iremos visualizar um céu iluminado, quase uniforme, que não está associado a nenhuma estrela ou galáxia, mas sim à Radiação Cósmica de Fundo em micro-ondas (CMB). Essa radiação é basicamente uma espécie de ruído que permeia todo o cosmos e que foi formada em uma época em que o Universo era quente e denso [37].

Uma outra propriedade importante da CMB é que o seu espectro de temperatura é praticamente idêntico a de um corpo negro e devido a isso, podemos usar a Lei de Stefan-Boltzmann para obter o fluxo luminoso desse fundo cósmico [37]:

$$F_{CMB} = \sigma T^4 \approx 3,15 \frac{\mu J}{s \cdot m^2} \quad (8)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$) e T é a temperatura da CMB ($T \approx 2,73 K$) [38]. Com esse resultado, podemos obter a razão entre o fluxo luminoso da radiação cósmica de fundo e o fluxo luminoso da luz visível:

$$\frac{F_{CMB}}{F_{VIS}} \approx 98 \quad (9)$$

Isso significa que o fluxo luminoso em micro-ondas, devido à radiação cósmica de fundo, é da ordem de cem vezes maior que o fluxo luminoso do visível. Em outras palavras, o céu é, de fato, luminoso, mas não onde estávamos observando ou esperávamos, realizando somente observações no ótico.

6. Conclusões

Neste artigo revisitamos a pergunta de Olbers sobre a escuridão do céu noturno. Mostramos o contexto histórico no qual esse questionamento foi formulado e as hipóteses que levaram ao aparente paradoxo. Em seguida, foi apresentado uma simples abordagem matemática que levou a uma conclusão precipitada de que o fluxo total devido às infinitas estrelas do universo é infinito ($\Phi = \infty$).

Com base nas explicações apresentadas ao longo do trabalho, podemos concluir que o Paradoxo de Olbers não é, de fato, um paradoxo. As hipóteses centrais que sustentavam o argumento de Olbers, ou seja, que o universo é infinito e que as estrelas emitem luz por um tempo infinito, foram refutadas pela astrofísica moderna e por numerosas e meticulosas observações ao longo de décadas. Ao contrário do que se acreditava na época de Olbers, o universo observável é finito no tempo e no espaço, de forma que a luz das estrelas mais distantes ainda não teve tempo suficiente para chegar até nós devido à finitude da velocidade da luz.

Embora o aparente Paradoxo de Olbers tenha levado séculos para ser finalmente resolvido, a astrofísica moderna forneceu explicações convincentes para as aparentes contradições presentes. Ao longo do trabalho mostramos como cada hipótese que sustentava o aparente paradoxo de Olbers foi refutada. A Teoria do Big Bang e as observações que a sustentam oferecem uma solução coerente para o aparente paradoxo, mas ainda há muitas questões em aberto na cosmologia, como por exemplo a incerteza na constante de Hubble, cujo valor depende da técnica observacional observada. Esta importante questão requer uma meticulosa investigação e esforços neste sentido estão atualmente em andamento, inclusive com novas e incríveis reviravoltas recentes [39].

Vale ressaltar que o Universo não é abundante em radiação visível, mas quando analisamos outras formas de radiação, sua luminosidade se torna evidente. Telescópios e sondas espaciais como o Hubble, James Webb, Planck e outros instrumentos, permitem a análise da radiação em diferentes comprimentos de onda. É justamente através de estudos pancromáticos que podemos de fato sondar o universo em todos os comprimentos de onda possíveis.

Além das premissas centrais do aparente paradoxo de Olbers não estarem corretas, a expansão do universo faz com que a luz das estrelas distantes seja deslocada para comprimentos de onda mais longos, sendo necessárias observações em múltiplos comprimentos de onda para verdadeiramente estudarmos estrelas e galáxias.

Em suma, a solução do problema repousa sobre três principais ideias: (i) a teoria da evolução estelar que garante a finitude das estrelas; (ii) a finitude do universo, garantida pela teoria do Big Bang e por sólidas observações; (iii) o desvio para o vermelho da luz das estrelas distantes, que implica em um universo muito luminoso, mas não nos comprimentos de onda do ótico.

Estes resultados explicam o aparente paradoxo, mostrando que o céu noturno não é tão brilhante no visível como Olbers esperava, mas é, de fato, abundante em radiação. Grande parte desta radiação é uma relíquia do universo primordial, uma prova irrefutável de uma origem em tempos remotos, cuja datação precisa ainda é alvo de intensas pesquisas e novas controvérsias.

Agradecimentos

Agradecemos à Escola de Ciências e Tecnologia (ECT) e ao Departamento de Física Teórica e Experimental (DFTE) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Jeremias Bezerra agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica que tornou possível esta pesquisa.

Referências

- [1] T.A. Hockey, V. Trimble, T.R. Williams, K. Bracher, R.A. Jarrell, J.D. Marchéll, F.J. Ragep, J. Palmeri e M. Bolt, *The Biographical Encyclopedia of Astronomers* (Springer, New York, 2007).
- [2] D. Hoffleit e C. Jaschek, *The Bright Star Catalogue* (Yale University, New Haven, 1991).
- [3] M. Jurio, Z. Ivezić, A. Brooks, R.H. Lupton, D. Schegel, D. Finkbeiner, N. Panmanabhan, N. Bond, B. Sesar, C.M. Rockosi et al., *The Astrophysical Journal* **673**, 864 (2008).
- [4] N. Copernicus, *De revolutionibus orbium coelestium* (Johannes Petreius, Nuremberg, 1543).
- [5] T.S. Kuhn, *The Copernican Revolution* (Harvard University Press, Cambridge, 1957).
- [6] T.S. Kuhn e J.B. Conant, *The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought* (Harvard University Press, Cambridge, 1992).
- [7] T.S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* (University of Chicago Press, Chicago, 1962).
- [8] N. Wilding, *Journal of the History of Ideas* **69**, 525 (2008).
- [9] A. Chapman, *The Observatory* **106**, 246 (1986).
- [10] R.S. Westman, *History of Science* **18**, 105 (1980).
- [11] R.S. Westman, *The Copernican Question: prognostication, skepticism, and celestial order* (University of California Press, Berkeley, 2011).
- [12] F.R. Johnson, S.V. Larkey e T. Digges, *The Huntington Library Bulletin* **5**, 69 (1934).
- [13] J.L.P. de Chéseaux, *Mémoires posthumes de Monsieur Jean Philippe Loys de Cheseaux* (Chez Antoine Chapuis, Lausanne, 1754).
- [14] N. Voudoukis e S. Oikonomidis, *European Journal of Engineering Research and Science* **2**, 23 (2017).
- [15] S. Mitton, *The Cambridge encyclopedia of astronomy* (Jonathan Cape, Londres, 1977).
- [16] M. Hoskin, *The Cambridge Concise History of Astronomy* (Cambridge University, Cambridge, 1999).
- [17] R.S. Westfall, *The Life of Isaac Newton* (Cambridge University, Cambridge, 1993).

- [18] H. Kragh, arXiv:1706.00726 (2017).
- [19] E. Harrison, *A Escuridão da Noite – Um Enigma do Universo* (Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 1987).
- [20] A.G.G.M. Tielens, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **46**, 289 (2008).
- [21] E.A. Poe, *Eureka: a prose poem (An essay on the material and spiritual universe)* (GP Putnam, New York, 1848), v. 1.
- [22] A. Gray, *Lord Kelvin An Account of His Scientific Life and Work* (Audubon Press & Christian Book Service, Laurel, 2008).
- [23] R. Flood, M. McCartney e A. Whitaker, *Kelvin: Life, Labours and Legacy* (Oxford University, Oxford, 2008).
- [24] W.J. Maciel, *Introdução à Estrutura e Evolução Estelar* (Edusp, São Paulo, 1999).
- [25] L. Knox e M. Millea, *Physical Review D* **101**, 043533 (2020).
- [26] K.C. Wong, S.H. Suyu, G.C.F. Chen, C.E. Rusu, M. Millon, D. Sluse, V. Bonvin, C.D. Fassnacht, S. Taubenberger, M.W. Auger et al., arXiv:1907.04869 (2019).
- [27] A.G. Riess, L.M. Macri, S.L. Hoffmann, D. Scolnic, S. Casertano, A.V. Filippenko, B.E. Tucker, M.J. Reid, D.O. Jones, J.M. Silverman et al., arXiv:1604.01424 (2016).
- [28] E. Di Valentino, O. Mena, S. Pan, L. Visinelli, W. Yang, A. Melchiorri, D.F. Mota, A.G. Riess e J. Silk, arXiv: 2103.01183 (2021).
- [29] N. Schöneberg, J. Lesgourgues e D.C. Hooper, arXiv: 1907.11594 (2019).
- [30] J.L. Bernal, L. Verde e A.G. Riess, arXiv:1607.05617 (2016).
- [31] Planck Collaboration: N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Ballardini, A.J. Banday, R.B. Barreiro, N. Bartolo, S. Basak, et al., arXiv: 1807.06209 (2018).
- [32] V. Mukhanov, *Physical foundations of cosmology* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
- [33] A.C. Phillips, *The physics of stars* (John Wiley & Sons, Hoboken, 1999).
- [34] I. Morison, *Introduction to Astronomy and Cosmology* (John Wiley & Sons, Hoboken, 2008).
- [35] J. Binney e S. Tremaine, *Galactic Dynamics* (Princeton University Press, Princeton, 2008).
- [36] G. Schilling, *Galaxies: Birth and Destiny of Our Universe* (Firefly Books, Richmond Hill, 2019).
- [37] R. Durrer, *The cosmic microwave background* (Cambridge University Press, Cambridge, 2020).
- [38] D.J. Fixsen, *The Astrophysical Journal* **707**, 916 (2009).
- [39] W.L. Freedman, B.F. Madore, D. Hatt, T.J. Hoyt, I.S. Jang, R.L. Beaton, C.R. Burns, M.G. Lee, A.J. Monson, J.R. Neeley et al., *The Astrophysical Journal* **882**, 34 (2019).