

Por que o céu é azul? Um experimento sobre espalhamento Rayleigh

Why is the sky blue? An experiment on Rayleigh scattering

Izaque Junior Oliveira Silva¹, Ana Luiza Poletto Loss¹, Ana Luz Pereira Mendes¹,
José Victor da Silva Izidorio¹, Daniel Bravin Martins¹,
Mayllon Emmanoel Pequeno Santos Silva¹, Davi José Araújo Pereira¹,
Marco Túlio Lima Rodrigues¹, Yasmin Barbosa Shimizu¹, Duanny Silva Onório^{1,4},
Alessandro de Souza Mourato¹, Valéria Spolon Marangoni¹, Leandro Nascimento Lemos¹,
Leandro Mercês^{1,3}, Natasha Fioretto Aguero², James Moraes de Almeida^{*1,4}

¹Ilum Escola de Ciência, Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, Campinas, SP, Brasil.

²Assessoria de Comunicação, Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, Campinas, SP, Brasil.

³Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Física “Gleb Wataghin” (IFGW), Campinas, SP, Brasil.

⁴Universidade Federal do ABC, Centro de Ciências Naturais e Humanas, Santo André, SP, Brasil.

Recebido em 12 de maio de 2025. Revisado em 19 de novembro de 2025. Aceito em 25 de novembro de 2025.

Apresentamos uma proposta de atividade sobre o fenômeno do espalhamento Rayleigh, elucidando a razão pela qual o céu é azul. Foram empregadas suspensões de leite em água, iluminadas por fontes de luz provenientes de celulares. A quantificação do espalhamento foi realizada por sensores RGB para Arduino, o que permitiu a detecção em tempo real da luz transmitida pela suspensão. Observou-se uma menor intensidade na componente azul e uma maior intensidade na componente vermelha, reproduzindo o efeito característico do pôr do sol. Além disso, esta atividade pode ser desenvolvida em distintos níveis: desde uma abordagem qualitativa, baseada na observação do fenômeno, até um processo automatizado de medição, utilizando códigos disponibilizados neste estudo. Ainda, o educador pode propor aos estudantes o desafio de elaborar seus próprios códigos. Portanto, este experimento busca despertar o interesse do aprendiz por um tema cotidiano, favorecendo a compreensão de fenômenos ópticos complexos em um contexto de aprendizagem interdisciplinar. A implementação mostrou-se exitosa, evidenciada pela apresentação espontânea da atividade por parte dos estudantes em eventos de extensão e pelo desenvolvimento do código de automação para o experimento descrito neste trabalho.

Palavras-chave: Laboratório de Física, Experimental, Espalhamento de Luz, Automação, Arduino.

We present a proposed activity regarding the Rayleigh scattering phenomenon, explaining why the sky is blue. Milk-in-water suspensions were used, illuminated by smartphone light sources. Scattering quantification was performed using Arduino-based RGB sensors, enabling real-time detection of light transmitted through the suspension. We observed lower intensity in the blue component and higher intensity in the red component, reproducing the characteristic effect of a sunset. Furthermore, this activity can be conducted at various levels, ranging from a qualitative approach based on visual observation to an automated measurement process using the code provided in this study. Additionally, educators can challenge students to develop their own code. Therefore, this experiment aims to spark learner interest in an everyday topic, facilitating the understanding of complex optical phenomena within an interdisciplinary learning context. The implementation proved successful, as evidenced by the students' spontaneous presentation of the activity at outreach events and the development of the automation code for the experiment described in this work.

Keywords: Physics Laboratory, Experimental, Light Scattering, Automation, Arduino.

1. Introdução

Os fenômenos ópticos celestes sempre exerceram fascínio sobre pessoas de diferentes idades e em diversas áreas do conhecimento. Uma questão aparentemente simples, como “Por que o céu é azul?”, abre caminho para

múltiplas abordagens, tornando-se um ponto de partida para reflexões históricas, metodológicas e didáticas. Ao longo da história, estudiosos como Ibn al-Haytham lançaram as bases da óptica, estabelecendo princípios que sustentam a ciência moderna [1–3]. Séculos depois, Isaac Newton aprofundou-se nesse campo, influenciado por pensadores como Descartes, Walter Charleton e Robert Boyle [4]. Graças à sua relevância científica e política, Newton popularizou o célebre experimento em que a luz

*Endereço de correspondência: james.almeida@ilum.cnpem.br

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

solar, ao atravessar um prisma, se decompõe em cores, revelando o espectro visível. Embora Newton e seus contemporâneos defendessem uma teoria corpuscular da luz, outra vertente, seguidora das ideias de Huygens, defendia que esta teria uma natureza ondulatória [5]. Tal hipótese foi posteriormente aprimorada por Fresnel, com a inclusão do fenômeno de interferência [6]. A comprovação experimental desse fenômeno foi realizada na Academia Francesa de Ciências em 1819, com a demonstração de que há um máximo de intensidade luminosa na região central da sombra de uma esfera. Essa região de elevada intensidade ficou conhecida como ponto de Huygens e é resultado da difração da luz — um fenômeno que, embora contraintuitivo para os cientistas da época, já havia sido previsto por Poisson [6]. Além disso, Thomas Young em 1801 realizou o experimento da dupla fenda, para defender o comportamento ondulatório da luz [7]. Tal experimento foi realizado diante da Royal Society da Inglaterra, precedendo o experimento de Fresnel. Atualmente, com a mecânica quântica bem estabelecida, os comportamentos antagônicos de corpúsculos e ondas, outrora debatidos, fazem parte de um só formalismo, que apresenta ondas e partículas como partes da natureza dual da matéria tal qual conhecemos [8].

Essa evolução no entendimento da luz nos conduz à concepção atual: a luz é formada por um conjunto de ondas eletromagnéticas. Em outras palavras, a luz é fruto de perturbações simultâneas nos campos elétrico e magnético, que se propagam no vácuo à velocidade constante, $c = 299.792.458 \text{ m s}^{-1}$. Vale destacar que a luz integra todo o espectro eletromagnético, embora a percepção humana seja restrita a uma faixa específica, denominada região visível, que abrange comprimentos de onda entre aproximadamente 380 e 750 nm [9]. Essa limitação biológica não diminui a complexidade do fenômeno, mas reforça a importância de compreender como essa pequena janela do espectro influencia nossa experiência cotidiana.

Entender como a luz interage com a matéria e suas implicações nas cores que percebemos é um tema relevante, pois tais fenômenos podem ser abordados considerando o comportamento ondulatório da radiação eletromagnética. Ao interagir com diferentes meios (átomos, moléculas e nanopartículas, entre outros), a radiação se sujeita a um fenômeno denominado espalhamento da luz. Três teorias se destacam na explicação do espalhamento elástico da luz, que ocorre quando o comprimento de onda que incide sobre uma partícula é o mesmo que o comprimento de onda que é espalhado, ou seja, a onda não perde energia [10]: a óptica geométrica, a teoria de Mie e o espalhamento Rayleigh.

A óptica geométrica, que inclui os fenômenos de refração e reflexão, explica as interações entre a luz e partículas com diâmetros muito maiores que o comprimento de onda da luz. No entanto, um fenômeno que foge da explicação da ótica geométrica é a difração, pois ele ocorre quando uma onda interage com um obstáculo de dimensões comparáveis a seu comprimento

de onda, resultando em uma alteração em seu ângulo de propagação. Tal ângulo de difração é responsável pela formação do formato circular dos halos [11], círculos coloridos ao redor da Lua ou do Sol no céu. Esse fenômeno é provocado pela difração da luz ao interagir com cristais de gelo presentes nas camadas mais altas da atmosfera [11].

Gustav Mie propôs um modelo, a partir das equações de Maxwell [12], que descreve a interação entre a luz e partículas esféricas homogêneas, cujo diâmetro é próximo do comprimento de onda da luz incidente [10, 13]. A partir desta descrição, ao interagir com a luz, as partículas tornam-se polarizadas e espalham a luz em todas as direções. A luz irradiada apresenta dependência com fatores como o índice de refração do material, o tamanho da partícula e o comprimento de onda da luz incidente. Embora a teoria de Mie e a Óptica Geométrica expliquem o espalhamento da luz sob algumas condições, a interação com partículas menores que um décimo do comprimento de onda da luz incidente é melhor descrita por meio da teoria de Rayleigh [14]. Neste caso, as partículas se comportam como dipolos que podem ser polarizados pela incidência da luz. A partir desse raciocínio, a seguinte descrição da intensidade da luz espalhada foi desenvolvida por Rayleigh [15, 16]:

$$I(\theta) = \frac{I_0 \pi^4 d^6}{8R^2 \lambda^4} \times \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \times (1 + \cos^2(\theta)), \quad (1)$$

na qual a intensidade espalhada (I) depende da intensidade incidente (I_0), do diâmetro da partícula (d), da distância da partícula ao ponto de observação (R), do índice de refração do meio (m) e do ângulo de espalhamento (θ); por fim, também há uma dependência, de forma inversamente proporcional, da quarta potência do comprimento de onda (λ). Portanto, temos que quanto menor o comprimento de onda, mais intensa será a dispersão. Como o azul ($\lambda = 450 \text{ nm}$) e o violeta ($\lambda = 380 \text{ nm}$) estão na faixa dos menores comprimentos de onda do espectro visível, eles são os mais espalhados. Com isso, deveríamos perceber o céu na cor violeta; no entanto, devido à baixa sensibilidade da visão humana ao violeta, aliada à menor emissão do Sol nessa faixa, observamos o azul como predominante no céu [17].

Reproduzir esse fenômeno em escala menor para uso em modelos didáticos já foi abordado na literatura, empregando diferentes metodologias experimentais. Rocha et al. [18] propuseram um experimento para a mimetização da atmosfera terrestre, utilizando uma cuba de vidro com uma solução de água e leite desnatado, que simula as partículas espalhadas na atmosfera. Os resultados experimentais corroboraram a teoria, uma vez que a luz azul, de menor comprimento de onda, foi mais espalhada do que a luz vermelha, tornando-se visível o tom azulado da suspensão nas laterais da cuba e avermelhada para a luz transmitida pela cuba. No entanto, tal experimento é qualitativo, onde o estudante apenas observaria o fenômeno sem realizar nenhuma medida quantitativa.

Outros tipos de compostos podem ser utilizados para a formação de uma suspensão coloidal, que é uma mistura de substâncias nas quais partículas pequenas estão suspensas em outra substância. Teixeira et al. [19] utilizaram uma solução de hidróxido de sódio com pequenas gotas de ácido sulfúrico diluído para a formação gradual de partículas que funcionaram como espalhadores de luz. Foi observado que, ao iluminar o tanque com uma luz branca colimada, ocorreu o espalhamento pela suspensão, simulando o efeito do céu azul no interior do tanque e o pôr do sol na luz transmitida. Com o aumento das quantidades de espalhadores, a luz que atravessa o tanque mudou gradativamente de amarelo para laranja e, por fim, para vermelho.

Pereira et al. [20] utilizaram nanopartículas de prata como coloides. Os autores observaram que, ao preencher o bquer com água pura, não foi possível observar o feixe de luz devido à ausência de partículas espalhadoras. Por outro lado, ao utilizar uma solução de prata coloidal, a passagem do feixe pelo meio tornou-se visível, evidenciando o espalhamento da luz pelas nanopartículas presentes na solução. Zagury et al. [21] utilizaram um espectrômetro portátil em um estudo que analisa a cor do céu durante o dia e o crepúsculo, com o objetivo de promover o entendimento e a quantificação das cores que compõem o céu.

Voltando ao questionamento inicial, “Por que o céu é azul?”, as várias respostas disponíveis na literatura científica e popular geralmente associam a cor do céu aos regimes de espalhamento Mie, Rayleigh e Tyndall [20]. No entanto, existem críticas à tendência de simplificar um fenômeno complexo, que depende de múltiplos fatores como a temperatura, o horário do dia, a localização geográfica e a direção de observação, reduzindo-o a um único efeito físico [22]. Alguns autores abordam o azul do céu por meio de discussões qualitativas e modelos físicos teóricos [18], enquanto abordagens mais quantitativas costumam focar no comportamento da luz monocromática [23] ou se utilizam de espectrorradiômetros para a realização das medições pertinentes [24].

Neste trabalho, propomos uma nova metodologia para a investigação quantitativa do regime de espalhamento Rayleigh, com o objetivo de desenvolver uma atividade didática voltada ao ensino superior, aliando a física e a computação. O principal diferencial deste trabalho frente a outros da literatura está em sua simplicidade e seu baixo custo, para que se obtenha um resultado quantitativo. Os trabalhos discutidos anteriormente realizam experimentos semelhantes; no entanto, ou abordam apenas o aspecto qualitativo da cor espalhada, ou utilizam equipamentos complexos e não facilmente disponíveis, como espectrorradiômetros. Em nossa proposta, utilizamos uma suspensão de leite em água, uma lanterna de celular e um Arduino com um sensor RGB ligado a um computador. Com isso, os estudantes realizam o experimento dentro de uma abordagem mais abrangente, programando o Arduino e o computador para coletar os dados e demonstrar que a luz azul é mais espalhada e

acaba resultando em uma menor transmitância ao longo da solução. Os níveis de aplicação da metodologia aqui reportada podem ser adaptados de acordo com o intuito do docente, por exemplo, automatizando a coleta de dados. Essa análise é apresentada como uma ferramenta didática em um ambiente de aprendizagem interdisciplinar, visando facilitar a compreensão desses fenômenos ópticos complexos por estudantes de graduação.

2. Metodologia

Neste trabalho, simulamos o espalhamento da luz empregando uma suspensão de leite em água. Este modelo é conhecido por mimetizar o espalhamento Rayleigh, como já apontado por outros autores [18, 25, 26]. O espalhamento de luz nesse cenário se deve à presença das micelas de caseína do leite, que possuem diâmetros próximos ou menores que o comprimento de onda da luz visível, como quantificado pela técnica de espalhamento dinâmico de luz (DLS). Portanto, o efeito do espalhamento Rayleigh pode ser modelado com uma suspensão de leite em água, devido ao tamanho médio das micelas que causam tal espalhamento. O aumento da concentração de leite ocasiona mais espalhamentos da luz incidente, o que é análogo à luz percorrer uma maior distância no meio. Isso ocorre com a luz do sol no entardecer/amanhecer, ao percorrer uma distância maior na atmosfera devido ao seu ângulo de incidência. No artigo de Rayleigh [16], ele discute se as partículas suspensas na atmosfera ou as próprias moléculas que compõem o ar causam o azul do céu. Por suas demonstrações, ele concluiu que as moléculas causariam, sozinhas, o azul do céu; porém, as partículas suspensas têm também a sua contribuição. Portanto, a aproximação do nosso modelo é levar em conta majoritariamente o espalhamento Rayleigh das partículas suspensas, i.e. das micelas do leite, principalmente.

Para o sistema experimental, como pode ser visto na Figura 1a, utilizamos um bquer de um litro contendo uma solução água com leite para mimetizar a atmosfera e pipetas de *pasteur* para a adição das quantidades necessárias de leite integral. Imediatamente ao lado deste bquer, posicionamos um sensor RGB para a quantificação das cores vermelha, verde e azul. No lado oposto, uma lanterna de telefone celular foi posicionada como fonte de luz. As posições devem ser mantidas fixas durante o experimento, para evitar variações na intensidade da luz, que podem interferir nos dados coletados. A intensidade da lanterna do celular deve estar no máximo; caso contrário, a detecção das diferentes cores pelo sensor pode não apresentar diferenças significativas.

A coleta de dados relacionados à cor foi realizada em uma sala com iluminação ambiente, uma vez que testes não evidenciaram diferenças significativas em ambientes escuros. No entanto, para uma melhor experiência qualitativa a olho nu, tanto das tonalidades azuladas quanto da luz avermelhada (transmitida), é recomendável, ao

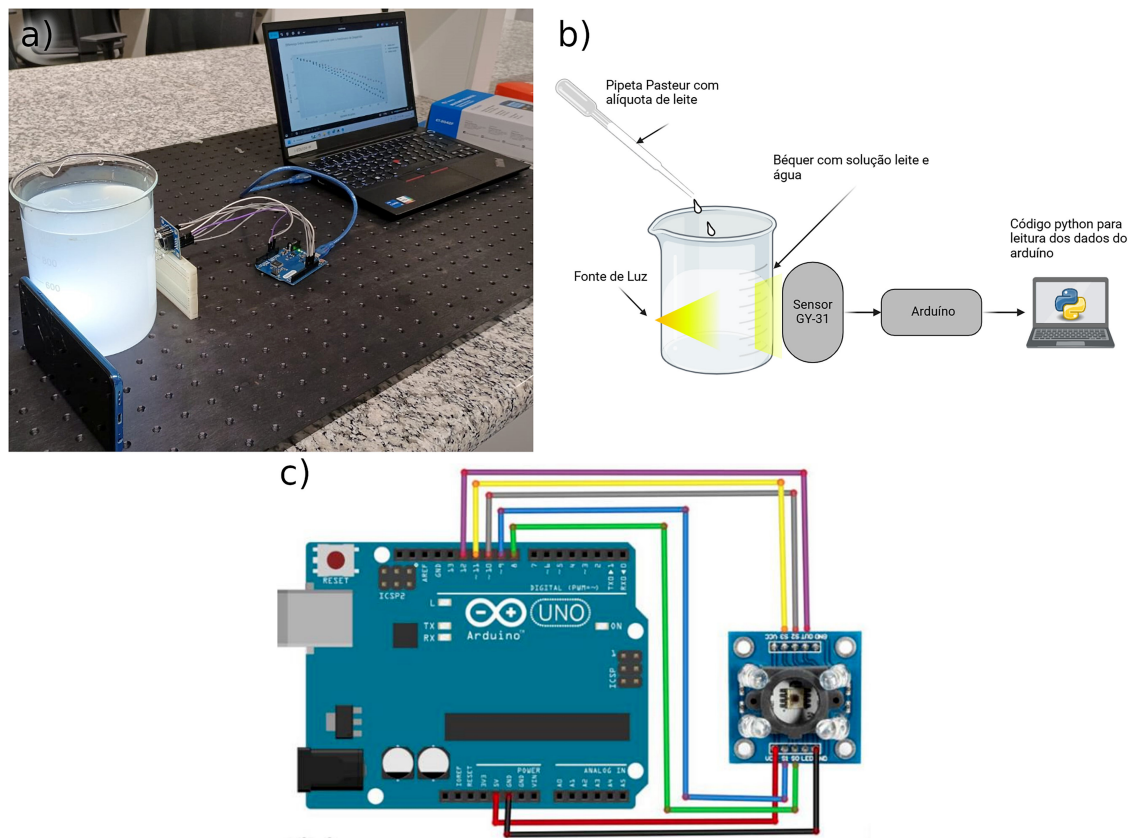


Figura 1: Ilustrações do experimento: a) foto do arranjo experimental, b) esquema do arranjo experimental, c) diagrama da ligação do sensor ao Arduino.

final do experimento, posicionar o béquer em um ambiente escuro ou com pouca iluminação.

É possível recriar fenômenos distintos, como o pôr do sol, no qual a luz solar, ao atravessar o horizonte, percorre uma distância maior na atmosfera. Isso resulta em um maior número de partículas com as quais a luz interage antes de alcançar o observador (Figura 2). No experimento aqui proposto, aumenta-se gradativamente a concentração de leite na solução, o que eleva a concentração de partículas, resultando em um maior espalhamento da luz incidente.

Para a obtenção de dados quantitativos referentes ao maior espalhamento da luz em frequências correspondentes à luz azul, utilizou-se um Arduino, uma plataforma de prototipagem eletrônica composta por uma placa com microcontrolador e um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), que permite a escrita, compilação e carregamento de programas diretamente no microcontrolador. Essa plataforma foi escolhida por sua versatilidade e facilidade de integração com diferentes tipos de sensores, além de seu baixo custo. No experimento, utilizou-se o sensor RGB (modelo GY-31) para a captação e quantificação de cores na escala RGB (do inglês vermelho, verde e azul, *Red, Green, Blue*).

O microcontrolador Arduino utilizado foi do modelo “Leonardo”; no entanto, outros modelos podem ser adotados. Ele permite a conexão entre o computador e o

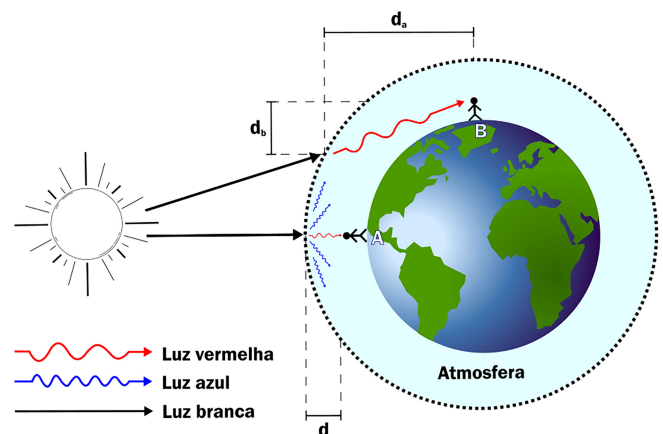


Figura 2: Representação dos caminhos percorridos pela luz azul e pela luz vermelha na atmosfera terrestre, onde A é o observador com Sol próximo ao meio dia, B é o observador no pôr do Sol, d seria a distância do início da atmosfera ao observador A, e $\sqrt{d_a^2 + d_b^2}$ é a distância percorrida na atmosfera pela luz no pôr/nascer do Sol.

sensor utilizado, possibilitando a aquisição e transmissão de dados. Além disso, para interligar os diferentes componentes eletrônicos, utilizamos cabos do tipo *jumper*, pois evitam a necessidade de soldagem, facilitando a prototipagem. Um cabo de conexão USB é empregado

para fornecer energia ao microcontrolador e estabelecer a comunicação com o computador.

Um script foi desenvolvido em Python utilizando as bibliotecas *Serial*, *Pandas*, *Numpy* e *Plotly*, para a coleta dos dados do Arduino. Isso permite o processamento e a exibição dos dados do experimento. Além disso, uma versão do código para Jupyter Notebook foi desenvolvida, oferecendo uma interface interativa para os usuários, facilitando a execução do experimento passo a passo e a análise visual dos dados. O código foi desenvolvido para ser versátil, permitindo ajustes conforme os requisitos do experimento, como a alteração da quantidade de amostras ou a quantidade de gotas de leite adicionadas a cada amostra. Tanto o código completo quanto a versão adaptada para o Jupyter Notebook estão disponíveis no repositório do GitHub [27]. No repositório, também estão disponíveis descrições detalhadas sobre sua utilização e funcionamento.

O sensor RGB é conectado ao Arduino conforme ilustrado na Figura 1c. Em seguida, o código deve ser carregado no Arduino [27]; é necessária a verificação de qual porta COM está sendo utilizada para a comunicação com o Arduino, para posterior aquisição no código Python. Após essa etapa, a IDE do Arduino deve ser fechada, e o código em Python desenvolvido para o experimento [27] deve ser aberto, configurando a porta COM obtida na IDE do Arduino.

Ao iniciar o programa, o usuário deve definir o número de medições a serem realizadas; recomendamos pelo menos vinte medições. Inicialmente, o sensor deve realizar a leitura sem a adição de quaisquer gotas de leite ao béquer contendo apenas água, estabelecendo um ponto de referência para a análise dos dados. Os valores de referência obtidos serão subtraídos de todas as medições subsequentes, inclusive da própria medição inicial (água sem gotas de leite), para cada uma das componentes do sensor RGB do Arduino; desta maneira, temos uma referência para o quanto a intensidade de cada canal de luz diminui à medida que a concentração de leite aumenta. Além disso, este procedimento garante o funcionamento em uma sala iluminada, pois a luz de fundo é descontada a partir da medida inicial. Em seguida, as gotas de leite são adicionadas à solução, que deve ser agitada antes de cada medição para garantir a homogeneização. Caso não haja pipetas disponíveis, deve-se assegurar que o volume de leite adicionado entre cada medição seja o mesmo, por exemplo, com a utilização de um conta gotas. O procedimento é repetido para cada nova medição: adicionar as gotas de leite, homogeneizar a solução, pressionar *Enter* para iniciar a leitura e registrar os dados.

Ao final da coleta de dados, o programa solicita a confirmação do número de gotas adicionadas a cada medida (duas gotas, neste caso). A partir dos dados coletados, um gráfico é gerado automaticamente, exibindo as intensidades das componentes de cor vermelha, verde e azul ao longo do experimento, descontando-se a medida

inicial sem a adição de leite, que serve como referência. No caso de nosso estudo, foram realizadas 30 medições no total.

Este experimento foi executado em turmas de alunos do primeiro semestre do primeiro ano do bacharelado em Ciência e Tecnologia, na Ilum Escola de Ciência do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM). A atividade, realizada dentro da disciplina de Práticas Básicas de Laboratório, iniciou-se com a exibição de um vídeo do canal Manual do Mundo no YouTube, intitulado “Por que o SOL FICA VERMELHO? Nós testamos”, onde é realizado um experimento qualitativo com uma cuba grande de vidro, água misturada com leite e uma fonte de luz [28]. Então, o docente explicou o espalhamento Rayleigh de forma teórica e sucinta, para em seguida lançar uma proposta de problema a ser resolvido pelos estudantes: demonstrar este fenômeno de maneira quantitativa usando Arduino. Dessa forma, os estudantes aprenderam a utilizar o sensor RGB com o Arduino, coletar os dados no computador via Python e analisar os resultados obtidos. Cabe ressaltar que os alunos haviam aprendido anteriormente nesta mesma disciplina a trabalhar com este microcontrolador. Para avaliação, os estudantes escreveram relatórios, com uma explicação dos fenômenos envolvidos, descrição da metodologia e apresentação e interpretação dos resultados.

Nesta atividade, o docente incentivou os alunos a trabalharem em grupos para obter uma possível solução e apresentá-la até o final da aula (4 horas). O papel do professor foi esclarecer dúvidas em cada equipe, sem fornecer respostas prontas. Além disso, os estudantes contaram com o suporte de um técnico de laboratório e do monitor da disciplina, que desempenharam papéis semelhantes ao do professor, tendo sido instruídos previamente pelo docente.

3. Resultados e Discussão

Quando o feixe de luz branca interage com a solução de água e leite contida no béquer, ocorre a predominância do fenômeno do espalhamento Rayleigh, pois o diâmetro hidrodinâmico médio das micelas de caseína, que compõem o leite, seria inferior a todos os comprimentos de onda do espectro visível. Em nosso experimento, realizamos medidas adicionais com um equipamento de espalhamento dinâmico de luz (*DLS*, Neovision Neo-DLS), que mostram que as micelas da solução de leite integral com água apresentaram diâmetro médio de $215 \pm 21\text{nm}$, em concordância com a literatura [29]. Além de o espalhamento da luz depender inversamente do comprimento de onda elevado à quarta potência, ele também depende do diâmetro da partícula elevado à sexta potência, conforme expresso na Equação 1. O tamanho das micelas formadas pelo leite é algumas ordens de grandeza maior do que as moléculas presentes na atmosfera; logo, uma quantidade reduzida dessa

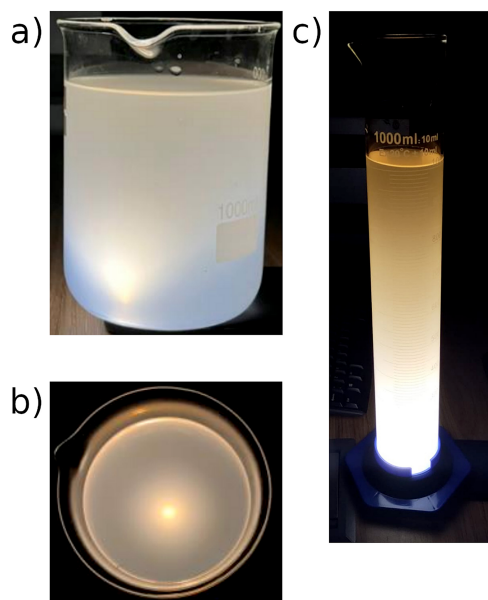


Figura 3: Observação das diferentes cores em dois setups experimentais a) foto do béquer com alta concentração de leite com fonte de luz na sua lateral visto de lado. b) Mesmo béquer, mas visto de cima. c) Proveta com leite e água com fonte de luz embaixo.

solução produz um efeito semelhante ao espalhamento Rayleigh observado no céu.

Ao analisar a solução no béquer ao final do experimento, com a maior concentração de leite, notou-se uma coloração azulada quando o béquer é observado pelas suas laterais, como mostrado na Figura 3a. Se trocarmos a posição da fonte de luz, colocando-a abaixo do béquer e observando-o de cima, uma coloração avermelhada é observada (Figura 3b). Isto ocorre devido à variação do caminho óptico percorrido por essa luz: na situação da Figura 3b, a luz percorre uma distância maior na solução, levando a um maior espalhamento dos comprimentos de onda associados às cores violeta e azul, conferindo assim maior intensidade aos componentes das cores restantes na luz transmitida. Além do experimento no béquer, também o realizamos em uma proveta, como mostrado na Figura 3c, com a fonte de luz logo abaixo da proveta, para que a luz percorra todo o recipiente. Essa abordagem é especialmente pertinente para a versão qualitativa do experimento, uma vez que o posicionamento de sensores no topo da proveta se torna mais complexo. Na Figura 3c, evidenciam-se as graduações de cor esperadas à medida que a luz atravessa a proveta. Assim, a região inferior, onde a luz foi menos espalhada, apresenta tonalidades mais próximas ao azul, enquanto a parte superior exibe cores avermelhadas. Esse padrão demonstra como as frequências de luz mais altas são predominantemente espalhadas, resultando na aparência de um pôr do sol na proveta.

No sensor RGB, há um chip semiconductor responsável pela detecção das cores, composto por uma matriz de 8×8 fotodiodos. Esses fotodiodos convertem luz em

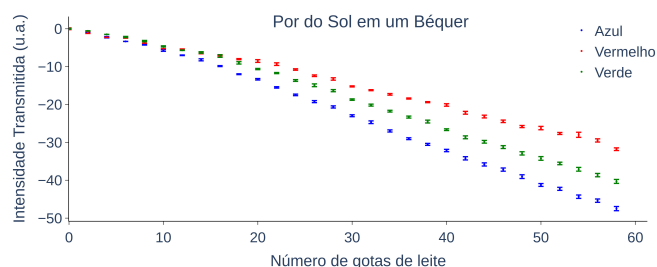


Figura 4: Dados obtidos durante a medida do sensor RGB ligado ao Arduino, da luz transmitida através do béquer com a solução de leite, mostrando os três canais de cores e suas respectivas barras de erro.

corrente elétrica, sendo 16 deles dedicados para detecção da cor vermelha, 16 à cor verde, 16 à cor azul e os 16 restantes detectam a intensidade total da luminosidade. Após a detecção da luz, os sinais captados pelos fotodiodos são convertidos em ondas quadradas, cuja frequência é proporcional à intensidade da luz incidente. Assim, o sensor é capaz de medir de maneira precisa a intensidade de cada componente de cor, possibilitando a análise quantitativa das cores na luz espalhada. No entanto, para se obter uma escala precisa de intensidade de luz, seria necessário calibrar o sensor. Esse procedimento seria complexo e apresentaria pouco ganho didático, pois o mais importante é comparar o decaimento da intensidade da luz nos canais de cores separadamente, para que o espalhamento Rayleigh seja demonstrado. Portanto, utilizamos unidades arbitrárias para a intensidade da luz na Figura 4. Os resultados quantitativos obtidos com o sensor RGB, são mostrados na Figura 4, no qual observa-se que conforme aumentamos a concentração de leite, há uma queda na intensidade luminosa captada para todas as cores estudadas (vermelha, verde e azul). Entretanto, essa queda não ocorre da mesma forma para todos os comprimentos de onda: a cor azul sofre a maior redução, enquanto a vermelha é menos afetada. Esse comportamento está de acordo com o fenômeno de espalhamento Rayleigh: a luz de menor comprimento de onda (azul) apresenta uma maior dispersão do que a luz de maior comprimento de onda (vermelha), resultando em uma diminuição da intensidade mais acentuada para o azul. Já a cor verde apresenta um comportamento intermediário, pois o seu comprimento de onda está entre os da cor azul e da vermelha. O vermelho, que possui o menor comprimento de onda das cores medidas, é espalhado de forma menos intensa, o que justifica a luz transmitida através da solução ficar avermelhada para concentrações mais altas de leite. Assim, tal análise dos dados comprova a validade do modelo empregado para a observação do espalhamento Rayleigh, possibilitando relacionar o fenômeno observado em laboratório com a coloração azul do céu, bem como do pôr do sol avermelhado.

Este experimento pode ser facilmente adaptado conforme a disponibilidade de equipamentos ou de acordo

com o nível de ensino (fundamental ou médio, por exemplo). Como alternativa qualitativa, sem a utilização de sensores ou Arduino, os estudantes podem simplesmente realizar o experimento com uma fonte de luz e aumentar gradativamente a concentração de leite, observando a luz transmitida avermelhada e a espalhada lateralmente azulada, sendo uma alternativa de baixo custo e com facilidade de materiais, que seriam um recipiente, leite e um celular. O docente pode optar por utilizar códigos e esquemas de ligação para a placa Arduino prontos, como fornecido pelos autores deste trabalho, tornando o processo automatizado e permitindo um maior foco na análise e quantificação do fenômeno. Outra possibilidade é incentivar os estudantes a descobrirem como realizar a ligação do sensor ao Arduino, escrever o código, automatizar a coleta e apresentar os dados, caso o propósito também seja o ensino da utilização do Arduino em experimentos ou de programação.

No caso específico deste trabalho, aplicamos a opção em que os estudantes desenvolvem todo o processo. Durante e após a execução desta atividade na Ilum, observamos o engajamento dos estudantes na realização da tarefa e a forma colaborativa de trabalho, entre eles e com os educadores. O envolvimento dos alunos pôde ser evidenciado em iniciativas que derivaram desta atividade: um grupo se voluntariou para apresentar este trabalho em ações de divulgação da faculdade para o público (“Ilum de Portas Abertas” e “Ciência Aberta”[30], nas edições de 2024 e 2025); outra equipe expandiu o experimento para ser utilizado como atividade semestral em outra disciplina (Prática de Ciência de Dados), desenvolvendo o sistema apresentado neste artigo para a automação de coleta de dados e geração de gráficos; e uma das estudantes, ao testar outros recipientes, teve a ideia de usar uma proveta para criar o efeito gradativo das cores do pôr do sol, apresentado como projeto semestral da disciplina de Práticas Básicas de Laboratório. Enfatiza-se que a maioria dos autores deste trabalho são, justamente, esses mesmos alunos, pois eles participaram de seu próprio processo de aprendizado, buscando soluções diferentes, além de envolver outras disciplinas com a utilização do experimento para as mesmas.

Desta forma, pudemos verificar que a aplicação deste experimento contribuiu não apenas para o aprendizado de conceitos físicos, mas também desenvolveu habilidades essenciais a um cientista em formação, tais como senso crítico, capacidade de inovação e autonomia, como pôde ser atestado pelas iniciativas próprias dos alunos em situações pós-aula. Salienta-se, ainda, que este experimento foi propositadamente pensado para envolver diferentes áreas do conhecimento, unindo conceitos de física teórica, experimental e programação. Ademais, os próprios alunos expandiram a atividade para outra disciplina curricular, demonstrando que o aspecto interdisciplinar foi internalizado e externalizado pelos estudantes. Por fim, cabe ressaltar que tais resultados puderam ser obtidos graças ao alinhamento dos professores da

instituição em planejar aulas com metodologias inovadoras, fomentando um clima questionador, reflexivo e colaborativo, além da abertura destes às ideias dos alunos e subsequente incentivo.

4. Considerações finais

O experimento realizado demonstrou com êxito o fenômeno do espalhamento Rayleigh, elucidando as razões pelas quais o céu apresenta coloração azul e o pôr do sol adquire tonalidades avermelhadas, conforme visto nas medidas das intensidades da luz em função da concentração de leite. Por meio da solução de água e leite, foi possível observar que a luz azul é espalhada com maior intensidade do que a luz vermelha, de acordo com a teoria de Rayleigh. Além disso, o experimento pode ser adaptado para diferentes níveis, desde um nível qualitativo, apenas com a observação do fenômeno; um quantitativo automatizado, em que os códigos para todas as medidas são disponibilizados; até um nível em que o estudante deve executar todas as etapas para a realização da experiência, o qual foi adotado pelos docentes envolvidos.

Este trabalho expõe uma abordagem interdisciplinar para o ensino de Física, em especial no ensino superior, utilizando metodologias laboratoriais aliadas a técnicas computacionais. A implementação de experimentos quantitativos proporcionou uma ferramenta eficaz para a educação científica, promovendo tanto a compreensão de fenômenos ópticos complexos quanto o desenvolvimento de competências essenciais para futuros cientistas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o financiamento do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), do Ministério da Educação (MEC), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 117839/2024-8, 125667/2024-8, 312243/2025-1, 308403/2025-8), à FAPESP (processos 2024/16774-0 e 2024/00989-7) e ao INCT Materials Informatics. Os autores também agradecem ao Sr. E. A. Terzian Simonka, estagiário da Ilum Escola de Ciência/CNPEM, pelo suporte técnico no curso de Práticas Básicas de Laboratório no primeiro semestre de 2025.

Disponibilidade de Dados

Todos os dados e códigos utilizados neste trabalho estão disponíveis em <https://github.com/JVictor1604/Autom-a-o-do-experimento-Rayleigh/releases/tag/2.0>.

Referências

- [1] G. Saliba e A. Sabra, *Journal of the American Oriental Society* **112**, 528 (1992).

- [2] R. Rashed, *Comptes Rendus Mecanique* **347**, 357 (2019).
- [3] A. Tbakhi e S.S. Amr, *Annals of Saudi medicine* **27**, 464 (2007).
- [4] R.A. Martins e C.C. Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 4202 (2015).
- [5] C. Huyghens, *Traité de la lumière* (Gauthier-Villars, Paris, 1690).
- [6] A. Fresnel, *Mémoire sur la diffraction de la lumière* (Académie Française des Sciences, Paris, 1818).
- [7] T. Young, *Philosophical transactions of the Royal Society of London* **94**, 1 (1804).
- [8] L. Broglie, *Nature* **112**, 540 (1923).
- [9] C. Starr, C. Evers e L. Starr, *Biology: Concepts and Applications* (Cengage Learning, Boston, 2016).
- [10] M. Elimelech, J. Gregory, X. Jia e R. A. Williams, em: *Chapter 9 - experimental techniques for aggregation studies* (Butterworth-Heinemann, Massachusetts, 1995).
- [11] A. Tufaile e A.P.B. Tufaile, *Physics letters A* **379**, 529 (2015).
- [12] Y.A. Akimov, arXiv preprint arXiv:2401.04146 (2024).
- [13] D.J. Lockwood, em: *Rayleigh and mie scattering* (Springer, New York, 2023).
- [14] C.A.C. Moreira, *Estrelas pós-agb e modelagem do envoltório circunstelar de estrelas water fountain*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2014).
- [15] L. Rayleigh, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **12**, 81 (1881).
- [16] L. Rayleigh, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **47**, 375 (1899).
- [17] M.H.U. Guimaraes e D. Soga, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **46**, e20240239 (2024).
- [18] M.N. Rocha, T.G. Fujimoto, R.S. Azevedo e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 3501 (2010).
- [19] S.K. Teixeira e P.A.M. Santos, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 341 (2002).
- [20] L.A.A. Pereira, R.C. Garcia, S.L. Gómez e R.F. Turchiello, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20220268 (2022).
- [21] F. Zagury, *Atmospheric and Climate Sciences* **2**, 510 (2012).
- [22] P.K. Raghuprasad, *Physics Essays* **30**, 116 (2017).
- [23] T. Katsumata, H. Aizawa, S. Komuro, S. Ito e T. Matsumoto, *International Dairy Journal* **109**, 104743 (2020).
- [24] S.D. Gedzelman, M.A. López-Álvarez, J. Hernandez-Andrés e R. Greenler, *Applied optics* **47**, H128 (2008).
- [25] A.V. Andrade-Neto, B.P. Carneiro e M. Paixão, *A Física na Escola* **17**, 24 (2019).
- [26] G. Hoeppe, *Why the sky is blue: discovering the color of life* (Princeton University Press, Princeton, 2007).
- [27] A.L.P. Loss, J.V.S. Izidorio, M.T.L. Rodrigues e Y.B. Shimizu, *Automação do experimento rayleigh*, disponível em: <https://zenodo.org/records/15022154>.
- [28] I. Thenório, M. Fulfaro, F.A. Souza, T.C. Silva, M. Albert, T. Paneto, A.L. Okuda, L. Egger, R.P. Spinelli, V. Moreira et al., *Manual do Mundo. Por que o SOL FICA VERMELHO? Nós testamos*, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=EtqXWYSjCsQ>.
- [29] C.M. Beliciu e C.I. Moraru, *Journal of Dairy Science* **92**, 1829 (2009).
- [30] L.N.C. de Oliveira, *Revista Educação Pública* **3**, 1 (2024).