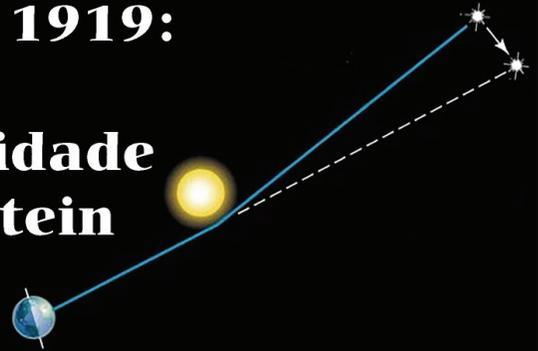
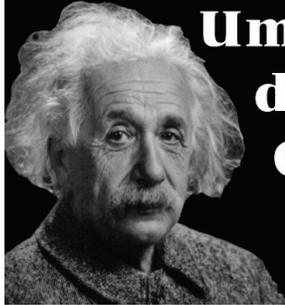


Simulação experimental do eclipse solar de Sobral em 1919: Uma comprovação da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein



.....
Diogo Soga

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: diogosp@usp.br

Daniel Moser Faes

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

Mikiya Muramatsu

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
.....

Introdução

No dia 29 de maio de 2019 são celebrados os cem anos do famoso experimento realizado na cidade de Sobral (Ceará) em 1919 [1-3]. Duas expedições científicas foram organizadas pelo Observatório de Greenwich (Inglaterra): uma foi enviada para a Ilha de Príncipe, localizada na África Ocidental, e a outra foi enviada para a cidade de Sobral, no Ceará. Os dois grupos deveriam registrar um eclipse solar total [4] em placas fotográficas no dia 29 de maio daquele ano, evento que duraria poucos minutos (pouco mais de 6 minutos). A expedição de Sobral acabou sendo a mais importante, pois o grupo na África observou sob céu parcialmente encoberto por nuvens.

Nesses registros fotográficos deveriam aparecer algumas estrelas do aglomerado das Híades, na constelação de Touro, na região perto da borda do Sol. A posição observada das estrelas (Fig. 1) deveria ser diferente da posição normal no céu, isto é, sem a presença do Sol entre elas e a Terra. Naquela época, a natureza da luz não era completamente conhecida. Se a luz fosse uma partícula com massa (como, por exemplo, o elétron) sua trajetória sofreria um desvio pela aceleração (newtoniana) da gravidade do Sol. Alternativamente, segundo a Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein, o Sol deveria modificar a trajetória da luz, mesmo esta não possuindo massa. A Relatividade prevê que um campo gravitacional intenso, como o produzido pela massa do Sol, é capaz de alterar a curvatura do espaço em seus arredores, de modo que a luz das estrelas próximas deixaria de percorrer um caminho retilíneo, causando

uma mudança aparente de posição. Atualmente essa distorção é chamada de lente gravitacional [5]. Registrar imagens do eclipse deveria permitir quantificar o deslocamento da posição de uma estrela que estivesse perto da borda do Sol em relação a sua posição normal. Além dos registros no dia do eclipse, cada expedição registrou imagens das estrelas sem o Sol [6]; em Sobral, os novos registros foram feitos após 7 semanas do eclipse [7]. Com as posições originais é possível calcular o desvio sofrido pela luz e comparar com o previsto por Einstein. O fenômeno foi

devidamente registrado, e os valores determinados dos desvios de posição das estrelas foram a primeira grande comprovação experimental da Teoria da Relatividade Geral de

A observação experimental em Sobral, Ceará, proporcionada pelo eclipse de 1919, permitiu a comprovação da Teoria Geral da Relatividade e abriu as portas para uma nova concepção de espaço-tempo

Einstein. Essa é a importância desse experimento em Sobral.

Hoje, o estudo de lentes gravitacionais é uma importante ferramenta para estudos de cosmologia e astrofísica [3,5]. Por exemplo, recentemente os astrônomos utilizaram outra estrela, que não o Sol, para medir o mesmo efeito registrado durante o eclipse em Sobral, porém com um deslocamento no céu centenas de vezes menor, mas observável por telescópios modernos. Esse efeito é por vezes chamado de microlentes gravitacionais.

O presente trabalho apresenta um arranjo experimental onde é feita a simulação do eclipse solar total, do desvio da luz pela lente gravitacional e enfatiza a importância do eclipse total para o experimento original. São utilizados materiais simples como uma lanterna, uma lupa e um LED. Este experimento pode ser realizado em sala de aula e é uma oportunidade do professor introduzir conceitos da física moderna e da astronomia nas

O presente trabalho apresenta um arranjo experimental onde é feita a simulação de um eclipse solar total como o ocorrido em 1919, que foi registrado em Sobral (Ceará). Tal observação foi a primeira comprovação experimental da teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein. Este experimento pode ser realizado em sala de aula e é uma oportunidade do professor introduzir conceitos da Física Moderna e Astronomia nas aulas de Ciência

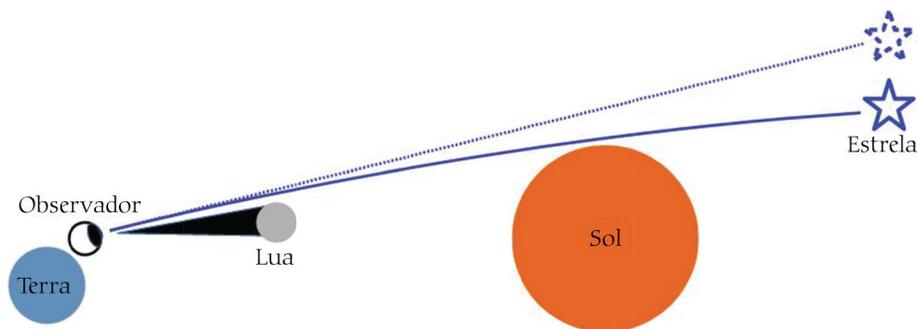


Figura 1: Representação do fenômeno de desvio pelo Sol (centro-direita) da trajetória da luz de uma estrela distante (linha cheia) e sua posição aparente (linha tracejada), vista por um observador na Terra (à esquerda). Representação fora de escala.

aulas de ciências.

Nas próximas seções apresentamos os materiais utilizados no experimento, descrevemos o processo de montagem e mostramos algumas imagens obtidas com o experimento.

Materiais

Na Fig.2 vemos o esquema do experimento do eclipse (ele não está em escala). Temos um LED que representa a estrela que fica atrás da lanterna, que representa o Sol. A enorme força gravitacional do Sol provoca a distorção do espaço, que é representada pela lente óptica, que desvia a luz do LED para a abertura por onde observamos o experimento. No esquema, temos uma linha cor magenta (centralizada verticalmente). Ela representa uma linha de orientação para o posicionamento da abertura, da lupa e da lanterna - todos esses elementos estão sobre ela. A luz direta do LED é barrada pela lanterna, mas alguns feixes de luz que se espalham em ângulos diferentes são redirecionados pela lente, atravessam a abertura e chegam ao observador. O orifício ajuda a diminuir a intensidade do LED e a direcionar os raios de luz. A abertura é o ponto de observação do experimento.

Os materiais necessários são os seguintes:

- a) um ambiente escuro;

- b) uma mesa longa, comprimento sugerido de 200 cm e largura mínima de 30 cm;
- c) um LED com uma fonte de energia elétrica e interruptor liga-desliga;
- d) uma lupa;
- e) uma caixa de papelão com as dimensões aproximadas de $(12 \times 12 \times 12) \text{ cm}^3$;
- f) uma lanterna;
- g) pedaços de papel ou plástico, na cor preta;
- g) diversos objetos para apoiar os materiais descritos acima: pregadores de roupa, borrachas, elásticos, rolos de fitas adesivas, caixas pequenas, tábuas etc.

A mesa é o suporte do experimento, sobre ela vamos montar os demais materiais. As dimensões citadas acima são aproximadas, o importante é que a mesa esteja em um ambiente escuro. O experimento ocupa apenas 30 cm na largura da mesa.

Foi utilizada uma lanterna (Fig. 3.a) de LED de luz branca, de diâmetro de 3 cm. O diâmetro da lanterna deve ser menor do que o diâmetro da lupa pois é preciso que a luz do LED possa passar pela lateral da lanterna e chegar à lupa.

A lente utilizada foi uma lupa de vidro (Fig. 3.b) de diâmetro de 10 cm.

A caixa de papelão (Fig. 3.c) contém a abertura de observação do experimento,

que evitará os efeitos de paralaxe. A paralaxe é um desvio aparente do objeto devido ao movimento do observador. Um dos lados da caixa é aberta, as abas são presas nas laterais da caixa com as fitas adesivas e os grampos, o que ajuda a melhorar a rigidez da caixa. Na outra extremidade é feita uma abertura de $(1,0 \times 1,0) \text{ cm}^2$. Se desejar, cole um pedaço de papel preto. A parte com abertura maior é direcionada para o experimento, e por ela passam os raios de luz da lanterna e do LED, para depois passarem pela abertura menor. As dimensões da caixa podem variar, pois o importante é que as luzes da lanterna e do LED possam entrar na caixa e passar pela abertura.

Destacamos dois tipos de LED: difuso e alto brilho. O LED difuso tem o bulbo fosco, já o segundo tipo é transparente e somente quando estão acesos visualizamos a cor. Para ilustrar melhor esse componente, neste trabalho apresentamos:

- um LED de alto brilho azul;
- um LED difuso vermelho;
- uma lanterna comercial com um LED de alto brilho de luz branca.

Na Internet há um vídeo que mostra a construção de uma lanterna com dois LEDs [8].

Na Fig. 4.a vemos um LED de alto brilho azul de um dispositivo eletrônico (Fig. 4.c) composto por uma placa de circuito elétrico, com uma bateria de 3 V,

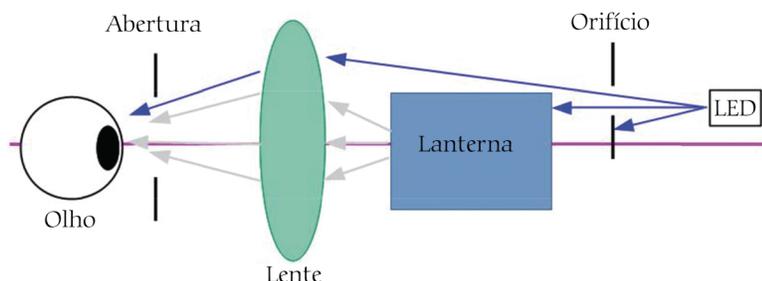


Figura 2: Esquema do simulador de eclipse.

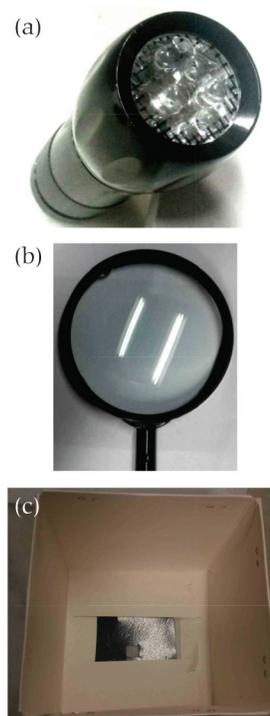


Figura 3: Alguns elementos do simulador. (a) Lanterna de LED. (b) Lupa de vidro. (c) Caixa com as aberturas.

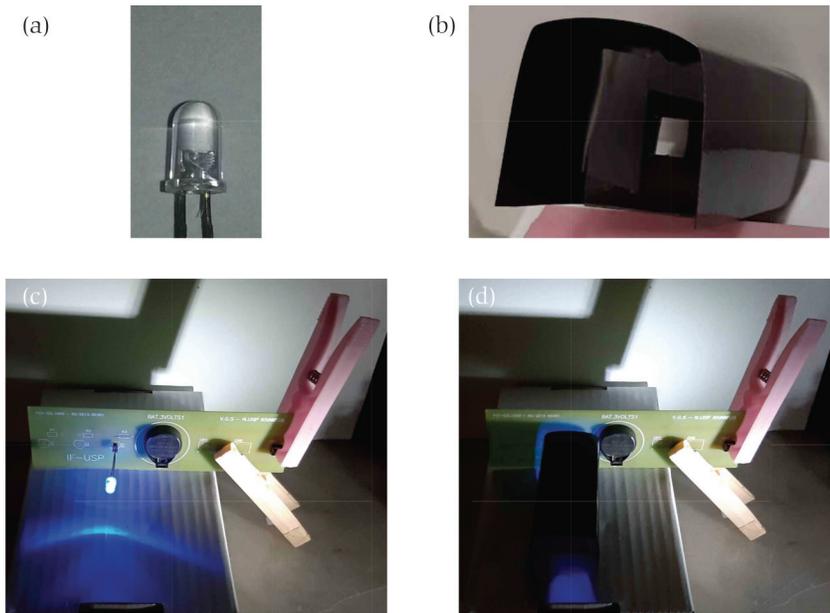


Figura 4: Dispositivo eletrônico com LED de alto brilho azul. (a) LED de alto brilho azul. (b) Capa preta. (c) LED azul aceso. (d) LED azul aceso e coberto.

uma chave liga-desliga, um suporte de LED e o LED. Para mantê-lo ligado e na posição vertical, usamos pregadores de roupa. Veja que a luz emitida pelo LED espalha-se em várias direções, o que prejudica o experimento. Para limitar a direção de espalhamento usamos uma capa retangular (Fig. 4.b) feita de plástico preto, que contém uma abertura de $(1,0 \times 1,0) \text{ cm}^2$. Ao cobrir o LED (Fig. 4.d) o espalhamento diminui drasticamente, como visto na Fig. 4.c.

Na Fig. 5.a vemos o LED difuso vermelho, ele não é transparente como o LED de alto brilho azul e a cor não é evidente, mas ela aparece ao ser ligado, vide Fig. 5.b. O LED está em um dispositivo, retirado de um brinquedo, que contém bateria e interruptor liga-desliga. Para manter o LED ligado foi usado um elástico de borracha. A luz emitida pelo LED não espalha tanto quando no caso do LED de alto brilho, então não é preciso usar a capa citada acima.

Na Fig. 6.a vemos uma lanterna com um LED de alto brilho de luz branca, um

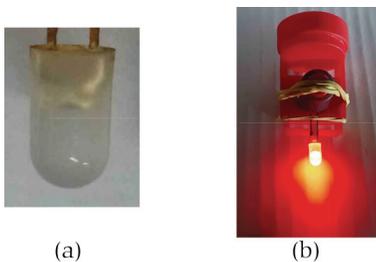


Figura 5: Brinquedo com um LED difuso vermelho. (a) LED difuso vermelho. (b) LED aceso.

produto comercial. Na Fig. 6.b a lanterna está acesa; nessa figura é possível notar que a luz emitida é espalhada de forma similar ao LED azul. Então a capa preta é utilizada com esta lanterna.

O brilho observado da estrela é mais fraco do que a luz do Sol. Se a intensidade da luz do LED é alta, é preciso reduzir a intensidade. Nesse caso, é necessário usar uma placa com um orifício pequeno, que é posto na frente do LED. A placa (Fig. 7.a) é um pedaço de plástico de cor preta com um orifício (Fig. 7.b) que foi feito com um alfinete; a borda ressaltada do orifício deve ficar voltada para o LED. Utilizamos duas placas com orifícios com os diâmetros de $1,5 \text{ mm}$ e $< 1,0 \text{ mm}$. O orifício de menor diâmetro deve ser feito com um alfinete sem que se passe totalmente o corpo do alfinete, apenas uma parte da ponta. A placa é posicionada na frente do LED. Se o orifício estiver perto do LED a intensidade aumenta, enquanto se for afastado a intensidade diminui. Indicamos usar a placa com o menor diâmetro com os LEDs de maior intensidade.

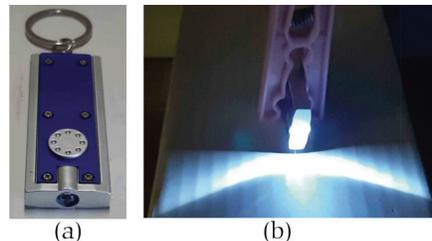


Figura 6: Lanterna de LED de alto brilho de luz branca. (a) A lanterna. (b) LED aceso.

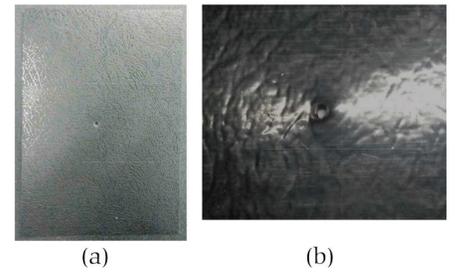


Figura 7: Placa preta com orifício. (a) A placa. (b) Imagem ampliada do orifício.

Uma observação importante: nesse experimento, *nunca usar* um diodo laser, ou outro tipo de laser, pois a luz é muito intensa e danifica os olhos. Olhar para a lanterna acesa por muito tempo também pode causar danos aos olhos. Contudo, para a realização do experimento, não é necessário manter a lanterna acesa por muito tempo.

A montagem do experimento segue o esquema descrito na Fig. 2. Os materiais ficam a 15 cm da borda da mesa. Esse valor não é rígido, pois depende dos materiais utilizados. O centro da lupa e da lanterna devem estar alinhados com o centro da abertura, conforme a linha magenta no esquema. Primeiro, coloque a caixa com a abertura, em seguida posicione lupa. Alinhe a lupa com a abertura, para que seja possível observar os objetos através dela. Depois, posicione o LED aceso a 120 cm da lupa; mova a lupa para frente ou para trás até ver o LED com clareza. Posicione o LED para que fique a meia altura da lupa, depois posicione para a lateral da lupa. A seguir, posicione a lanterna no centro da lupa a cerca de 5 cm da mesma, realinhe o LED novamente, para que fique próximo da lanterna mas de forma visível. Posicione a placa com orifício na frente do LED, alinhe a posição do orifício com o LED e mova a placa para atenuar a intensidade da luz que chega na abertura. Na Fig. 8 vemos a montagem experimental utilizada; a placa com orifício está ao lado do LED. Rolos de fita adesiva e caixas foram utilizados como suporte. É possível registrar imagens do experimento usando uma câmera digital; ela pode ficar apoiada na caixa e registrar as imagens da abertura menor. Note a simplicidade da montagem.

O experimento e a simulação da lente gravitacional

Registramos imagens usando cada um dos três LEDs especificados acima. Na Fig. 9 vemos as imagens com o LED difuso vermelho. Em (a) vemos um mancha vermelha do lado direito perto da meia altura da imagem com o fundo escuro. A mancha deveria ser um pequeno círculo ver-



Figura 8: Imagem da montagem experimental do simulador.

melho, o que indica que a lanterna está barrando parte da luz do LED. Nessa imagem temos o eclipse do Sol, representado pela lanterna apagada, e devido à presença da lente gravitacional (lupa), parte da luz do LED (estrela) chega ao observador. Em (b) vemos a lanterna acesa e não vemos mais a mancha vermelha, pois a intensidade da lanterna é muito maior do que a do LED, o que permite entender a necessidade do eclipse do Sol no experimento original, pois a intensidade da luz da estrela é tão pequena que não seria possível observá-la sem que ocorresse o eclipse total do Sol pela Lua. Em (c) a lanterna é desligada e a lupa é retirada da montagem; o resultado é uma escuridão completa, que representa a situação caso não existisse a lente gravitacional, isto é, o campo gravitacional do Sol não modificaria o espaço ao seu redor, então a luz da estrela não atingiria a Terra e não veríamos a luz dessa estrela, mesmo ocorrendo o eclipse do Sol. Em (d) a lanterna é retirada, o que corresponde a uma observação noturna, isto é, sem o Sol e seu campo gravitacional, a luz direta do LED chega ao observador. Observe que aqui temos quase um ponto, perto do centro da imagem, e a posição mudou. No experimento original, essa diferença de posição foi medida para calcular o desvio da luz feito pelo Sol, o que confirmou a teoria de Einstein.

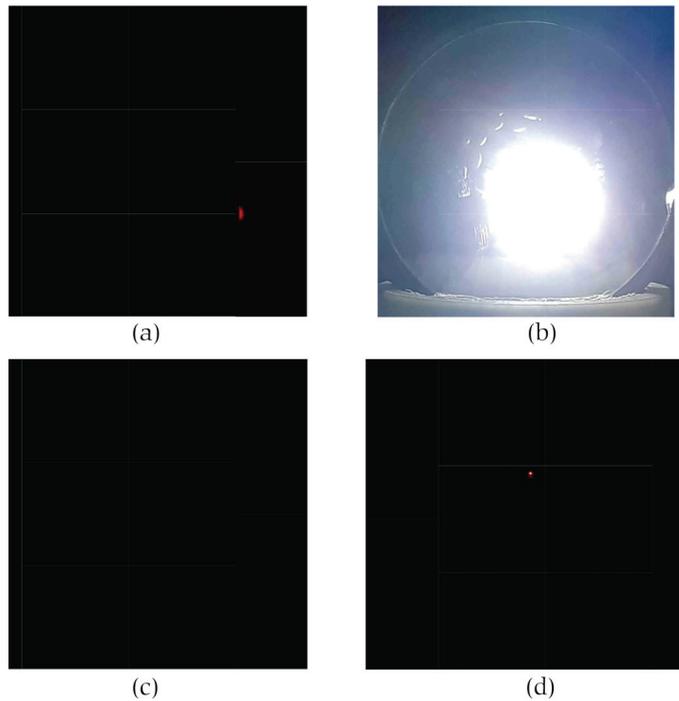


Figura 9: Experimento com LED difuso vermelho. (a) O eclipse com a estrela. (b) O Sol sem o eclipse. (c) Sem a lente gravitacional. (d) A luz da estrela.

Na Fig. 10 temos o experimento com o LED de alto brilho azul. Os resultados são semelhantes aos obtidos no experimento anterior. Na Fig. 10.a o halo azul está no lado direito e a meia altura da imagem, o que indica que a lanterna não barra parcialmente a luz do LED, como na Fig. 9.a. Em (b) vemos que o halo azul some e vemos apenas a luz da lanterna. Sem a lupa em (c) vemos a escuridão espe-

rada. Retirando a lanterna e a lupa, em (d) vemos a luz do LED, a posição diferente, perto do centro da imagem e um pouco para cima.

Os resultados do experimento usando a lanterna de luz branca estão na Fig. 11, neste caso apresentamos apenas as duas imagens mais relevantes. Em (a) vemos uma mancha branca, como na Fig. 9.a. E o resultado em (b) é semelhante aos obser-

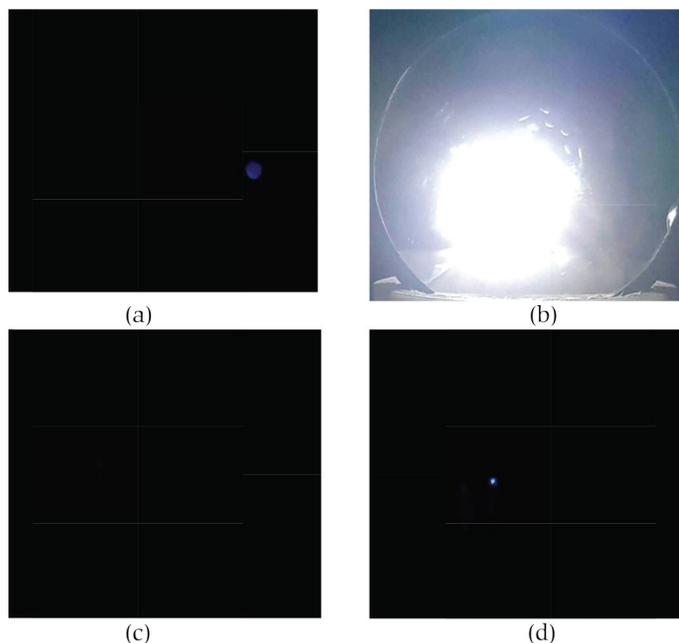


Figura 10: Experimento com LED de alto brilho azul. (a) O eclipse com a estrela. (b) O Sol sem o eclipse. (c) Sem a lente gravitacional. (d) A luz da estrela.

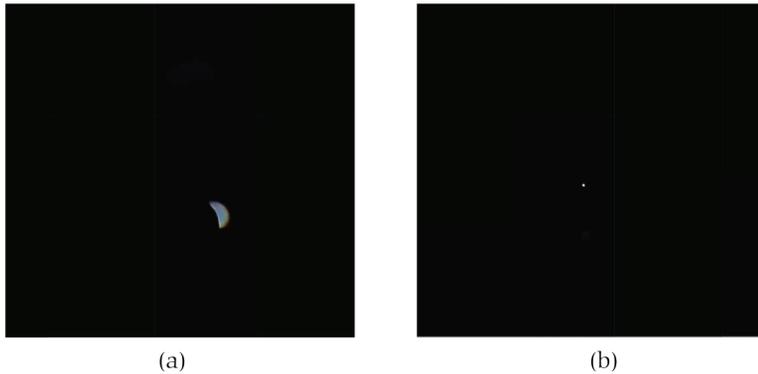


Figura 11: Experimento com a lanterna de LED de luz branca. (a) O eclipse com a estrela. (b) A luz da estrela.

vados anteriormente. O uso do LED de luz branca dificulta o ajuste da intensidade dele, pois a luz branca do LED confunde-se com a luz branca da lanterna. Os LEDs coloridos são mais fáceis de distinguir da luz branca da lanterna. Também é mais fácil usar um LED difuso colorido, pois têm brilho menor do que os LEDs de alto brilho.

Destacamos que é possível montar o experimento em duas mesas, uma contendo o LED e o orifício, e o resto em outra mesa. O experimento também pode ser apresentado em uma feira de ciências.

Comentários finais

Neste trabalho foi apresentada uma simulação experimental do eclipse solar observado em Sobral em 1919, usando

uma montagem simplificada para facilitar a confecção em sala de aula ou em um laboratório escolar. A quantidade de materiais necessários é pequena e de fácil aquisição.

Destacamos os principais fenômenos presente no experimento:

- Temos a observação de uma estrela que se torna visível durante um eclipse solar, propiciado pelo alinhamento com lua. Essa estrela está localizada atrás do Sol, portanto seria impossível visualizá-la sem a lente gravitacional do Sol.
- Entendemos a necessidade da ocorrência do eclipse solar para observar a estrela devido ao seu brilho de baixa intensidade quando comparado ao do Sol.

- Ilustramos o papel da lente gravitacional do Sol e seu efeito relativístico ao se retirar a lente da montagem.
- Vemos a diferença da posição da estrela sem a lente gravitacional.

Além da facilidade de aquisição e montagem, este experimento é de fácil compreensão, pois é visualmente simples. Estão envolvidas somente análises geométricas e comparação de intensidades de luz em grande contraste. Dessa forma, o experimento é uma poderosa ferramenta para introduzir e discutir alguns conceitos de astronomia e física moderna nas aulas de ciências.

Referências

- [1] A. Zylbersztajn, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **6**, 224 (1989).
- [2] A.A.P. Videira, *Física na Escola* **6**(1), 83 (2005).
- [3] https://pt.wikipedia.org/wiki/Lente_gravitacional, acessado em 02/05/2019
- [4] S.H.B. Livi, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **10**, 262 (1993).
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=f0d9ImEerI0>, acessado em: 11/04/2019.
- [6] D.A.T. Vanzella, *Física na Escola* **14**(1), 34 (2016).
- [7] L.C.B. Crispino, M.C.Lima, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, e4203 (2016).
- [8] <https://www.youtube.com/watch?v=oFhrs76YN3A>, acessado em 11/04/2019.