

favor da esfericidade da Terra; Aristarco de Samos³ (320 – 250 a.C.) usou a *sombra* da Terra sobre a Lua, para determinar as dimensões cosmológicas e Eratóstenes de Cirene⁴ (270 – 190 a.C.) usou a *sombra* de uma estaca, na medida da circunferência da Terra.

- Os atrasos de cerca de 10 min nos eclipses dos satélites de Júpiter permitiram, em 1675, que Ole C. Römer (1644 – 1710) provasse, pela primeira vez, a finitude da velocidade da luz (<http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=43> – acessado em 30/07/2015).
- O eclipse do Sol possibilitou, em 1868, que Lockyer (1836 – 1920) identificasse um elemento até então desconhecido – o hélio – no espectro da cromosfera solar. Em 1919, um eclipse do Sol permitiu que Eddington (1882 – 1944) realizasse a observação do desvio da luz de uma estrela pela massa do Sol, conforme previa a Teoria da Relatividade Geral.

A falta de conhecimento sobre as sutilezas da sombra pode levar a interpretações erradas de fotografias reais. Como exemplos podemos citar o caso da “*face em Marte*” (NASA, 1998)⁵, em que sombras causadas por reentrâncias em uma rocha marciana lhe deram a aparência de uma cabeça humana, o que foi usado como indicativo de que seria uma rocha construída artificialmente, e o caso da “*farsa da Lua*” (MOON HOAX, 2003), em que diferenças nas direções e comprimentos das sombras dos astronautas, sondas lunares e rochas da superfície lunar foram usadas como “evidência” de que as fotos da pousada do homem na Lua seriam montagens⁶.

³ - Para calcular as distâncias que separam o Sol e a Lua da Terra e os seus tamanhos, Aristarco parte de seis hipóteses (HEATH, 1981; p. 353). A hipótese 5 afirma que o diâmetro do *cone de sombra* da Terra, quando a Lua o atravessa (eclipse *total* da Lua), é duas vezes o diâmetro da Lua (<http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=678> – acessado em 30/07/2015).

⁴ - Eratóstenes, o bibliotecário da grande coleção de manuscritos de Alexandria, mediu a extensão da *sombra* que uma estaca, cravada verticalmente sobre o solo horizontal de Alexandria, tinha ao meio-dia num dia em que o Sol estava no zênite na cidade de Siene (VERDET, 1991). Pelo comprimento da sombra, inferiu que o ângulo subtendido pelo arco de circunferência que separa as duas cidades (Siene se situa ao sul de Alexandria) era aproximadamente 7° e, conhecida a distância entre as duas cidades (Alexandre o Grande havia mandado medir os caminhos do Egito), determinou a circunferência da Terra (<http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=1016> – acessado em 30/07/2015).

⁵ - A “*face em Marte*” foi vista pela primeira vez em fotos tiradas pela sonda Viking I, em 1996 (NASA, 1998), e foi inicialmente divulgada como sendo uma formação rochosa lembrando uma face humana. Novas imagens da mesma rocha, tiradas em 1998 pela sonda Mars Global Surveyor (MSSS, 2001), de um ângulo diferente, não apresentaram tal semelhança, indicando que a aparência de face humana dependia da iluminação e do ângulo de visada.

⁶ - Os defensores da “*farsa da Lua*” usam argumentos equivocados e refutáveis, pois as diferenças nos ângulos e comprimentos dessas *sombras* são perfeitamente explicadas por efeitos de perspectiva e de ondulações na superfície lunar.

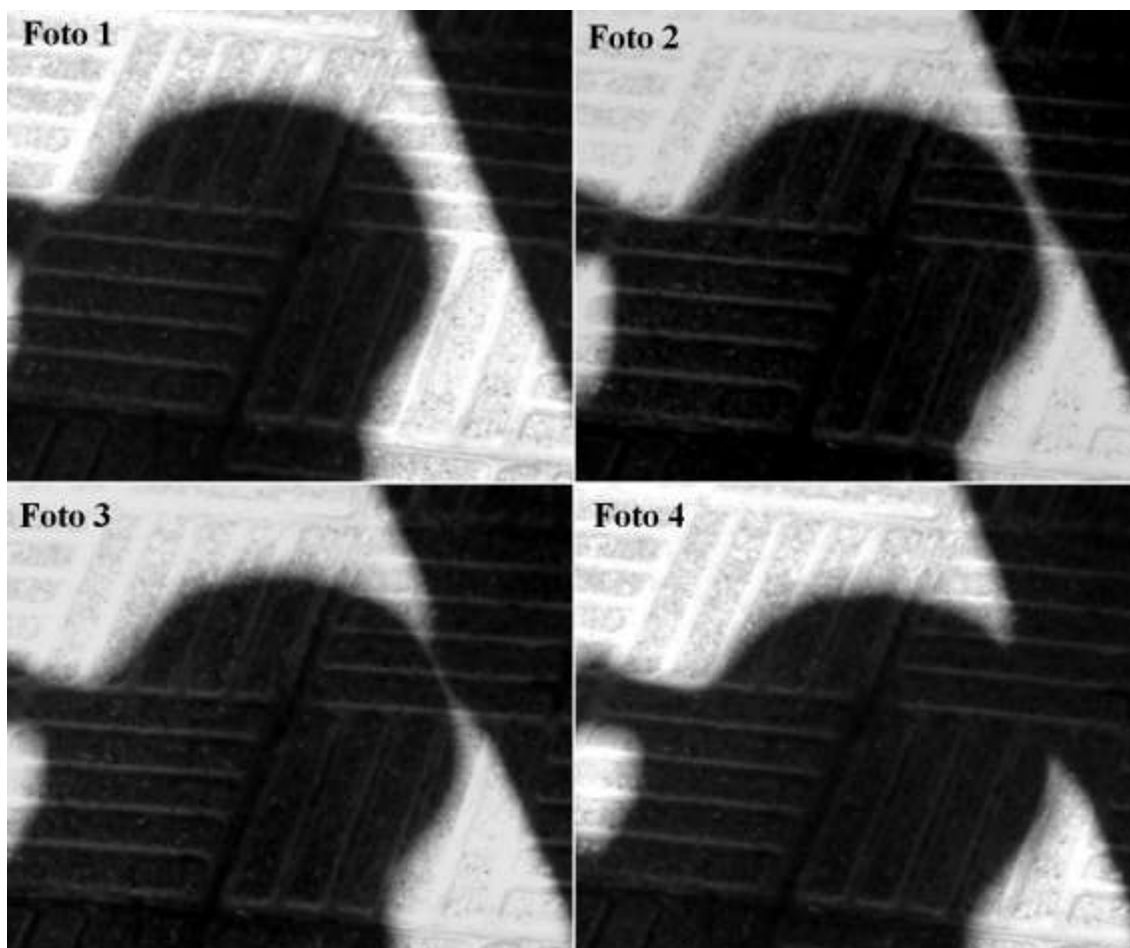


Figura 1 – Projetada sobre a calçada, a sombra da cabeça do fotógrafo “atrai” a sombra da parede, deformando-a.

Na figura 2, uma sequência de fotos mostra a sombra da aba do alpendre “atraindo” a sombra da cabeça do fotógrafo e a deformando. Diferentemente do caso anterior, agora é a sombra da cabeça do fotógrafo que se deforma e avança em direção à sombra do alpendre. O efeito também está registrado em um vídeo que pode ser encontrado nos seguintes endereços: <https://www.youtube.com/watch?v=S42XaPdcAPs> e <https://www.youtube.com/watch?v=mQnYBR4PTCw> (acessados em 30/07/2015)

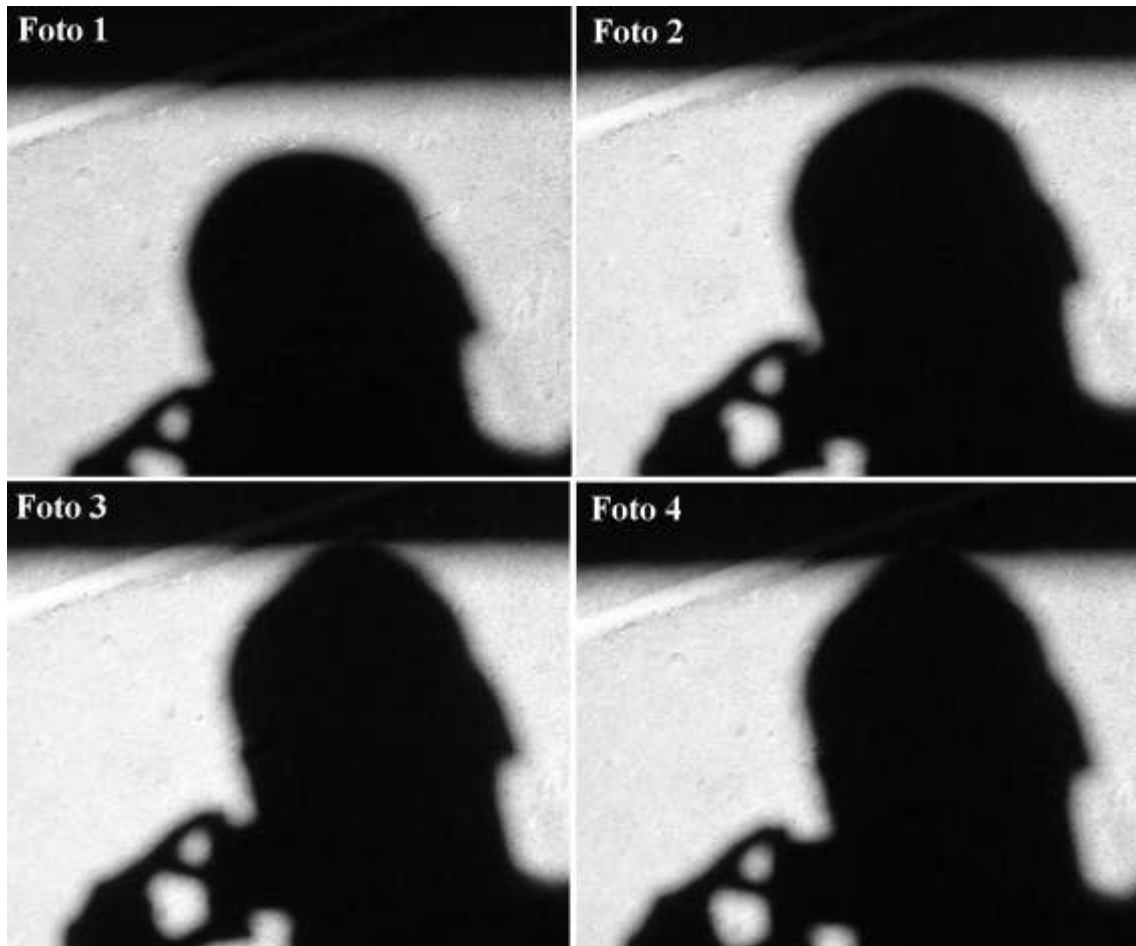


Figura 2 – Projetada sobre a calçada a sombra da aba do alpendre “atrai” a sombra da cabeça do fotógrafo, deformando-a.

Antes de esclarecermos as razões do inusitado comportamento, esboçaremos o enunciado de uma *lei de “atração” entre sombras* que pode ser testada facilmente pelo leitor: *Quando duas sombras se aproximam, aquela que se encontra mais próxima do objeto que lhe corresponde será “atraída” (deformada) pela outra sombra, a do objeto mais distante.*

Na figura 1, para obter a deformação da sombra da parede, o fotógrafo encontrava-se mais distante da própria sombra do que a parede da sua. Na figura 2, a situação se inverte: o chão estava mais próximo da cabeça do fotógrafo do que da aba do alpendre.

Passemos agora à explicação do efeito.

Uma fonte de luz pode ser pontual ou extensa. O fato de o Sol ser para nós uma fonte luminosa extensa que subtende, em pontos situados na Terra, um pequeno ângulo de aproximadamente $0,53^\circ$, faz com que raios luminosos provenientes de regiões diferentes do disco solar incidam aqui na Terra segundo direções diferentes.

VI WORKSHOP PARANAENSE DE ARTE-CIÊNCIA
2015: Ano Internacional da Luz

4th INTERNATIONAL MEETING ON ART-SCIENCE
2015: THE INTERNATIONAL YEAR OF LIGHT

Universidade Estadual de Ponta Grossa - Ponta Grossa - Paraná

22 a 24 Setembro de 2015

encontra deformada em relação à sombra próxima, apresentando uma cabeça mais estreita em relação ao tamanho do tronco.

Promoção:



Apoio:





Figura 5 – Sombra próxima e afastada do fotógrafo.

Na figura 6 vê-se a sombra de uma grade de arames sobre um piso de lajotas. No lado esquerdo da foto o piso se encontra próximo da grade e, conforme se avança para o lado direito, a grade se afasta do piso. Observa-se que, concomitantemente com o crescimento da distância entre a grade e o piso (isto é, no sentido da esquerda para a direita), a região de penumbra em torno da sombra dos arames cresce. Na parte mais distante do piso (lado direito da foto) resta apenas a penumbra produzida pelos arames.



Figura 6 – Grade de arame intercepta a luz solar produzindo sombra e penumbra.

O efeito de “encolhimento” da sombra, originada pela interposição de um objeto à luz solar, pode ser facilmente previsto tendo-se em conta que os raios luminosos provenientes do disco solar são divergentes conforme já notado nas figuras 3 e 4. A figura 7 representa um obstáculo à luz solar e a conseqüente região de sombra que ele produz. Por meio de um simples cálculo trigonométrico, é fácil estimar-se que a região de sombra termina a uma distância cerca de 108 vezes a extensão L do obstáculo.

VI WORKSHOP PARANAENSE DE ARTE-CIÊNCIA
2015: Ano Internacional da Luz

4th INTERNATIONAL MEETING ON ART-SCIENCE
2015: THE INTERNATIONAL YEAR OF LIGHT

Universidade Estadual de Ponta Grossa - Ponta Grossa - Paraná

22 a 24 Setembro de 2015

representada em escala compatível com a escala do diâmetro da Terra a sombra da Lua na Terra.

Promoção:



Apoio:





Figura 9 – A sombra da Lua na superfície da Terra durante um eclipse solar total tem um diâmetro com no máximo cerca de 250 km. Somente observadores dentro dessa sombra “encolhida” poderão perceber o eclipse como total.

Vejamos agora como a Terra eclipsa a Lua. Quando em uma Lua Cheia acontecer o alinhamento Lua-Terra-Sol, o cone de sombra da Terra sempre atingirá a órbita da Lua pois a sua extensão é muito maior do que a distância de apogeu da Lua, acontecendo então um eclipse total¹² da Lua. O diâmetro do cone de sombra da Terra à distância da Lua é facilmente calculável e se situa em valores próximos a 0,7 diâmetros terrestres ou 2,6 diâmetros lunares (a figura 10 é uma representação das condições para a ocorrência de um eclipse lunar total, embora os diâmetros e as distâncias entre os três corpos não estejam em escala). Vale notar que Aristarco de Samos (vide a nota de rodapé 2), três séculos antes de Cristo, já estimava em cerca de dois diâmetros lunares o diâmetro do cone de sombra da Terra na região onde passa a órbita da Lua.

¹² - Para a Lua entrar no cone de sombra da Terra e acontecer um eclipse lunar total a máxima distância angular entre a Lua e o nodo da órbita lunar deve ser menor do que $4,6^\circ$ se a distância for maior do que isso, mas menor do que 10° acontecerá um eclipse lunar parcial, quando apenas parte da Lua atravessa a região de sombra (OLIVEIRA FILHO E SARAIVA, 2004, p. 46-47).

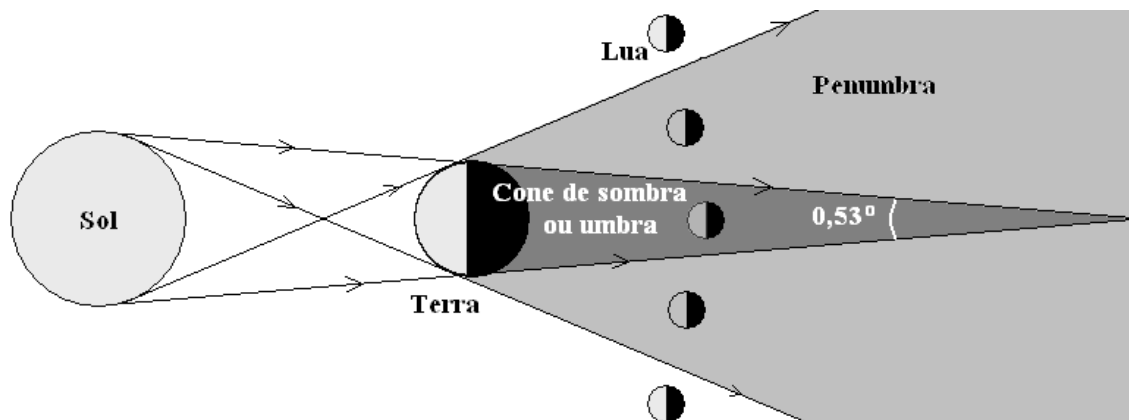


Figura 10 – O diâmetro do cone de sombra da Terra perfaz cerca de 0,7 diâmetros terrestres ou 2,6 diâmetros lunares na região onde orbita a Lua.

Mais detalhes sobre o “encolhimento” das sombras pode ser encontrados em SILVEIRA E SARAIVA (2008).

4 – IMAGENS DO SOL OBSERVADAS EMBAIXO DAS ÁRVORES

Quando a luz solar que passa entre as folhagens das árvores incide no chão ou em paredes, é comum se observar manchas luminosas com formas arredondadas. Como são elas produzidas se os espaços pelos quais a luz passa têm geometrias irregulares e variáveis? Em circunstâncias especiais, pode acontecer que essas manchas se apresentem com forma quase circular e de mesmo tamanho. Como se explica tal padrão? Apesar de a ocorrência das referidas manchas luminosas ser extremamente comum, a grande maioria das pessoas sequer toma consciência delas. A figura 11 mostra algumas dessas manchas luminosas no chão embaixo de árvores.

- Como a potência luminosa que atravessa o orifício depende da área do orifício, orifícios com dimensões diferentes, posicionados à mesma distância de um anteparo, conjugarão imagens com aproximadamente o mesmo diâmetro, todavia, com diferentes brilhos.

Para que possamos observar imagens do Sol sobre um anteparo embaixo das árvores conforme representado na figura 12, é necessário que os espaços ou “orifícios” entre as folhagens, que permitem a passagem da luz proveniente do Sol, estejam afastados do anteparo por uma distância que favoreça a ocorrência de imagens do disco solar.

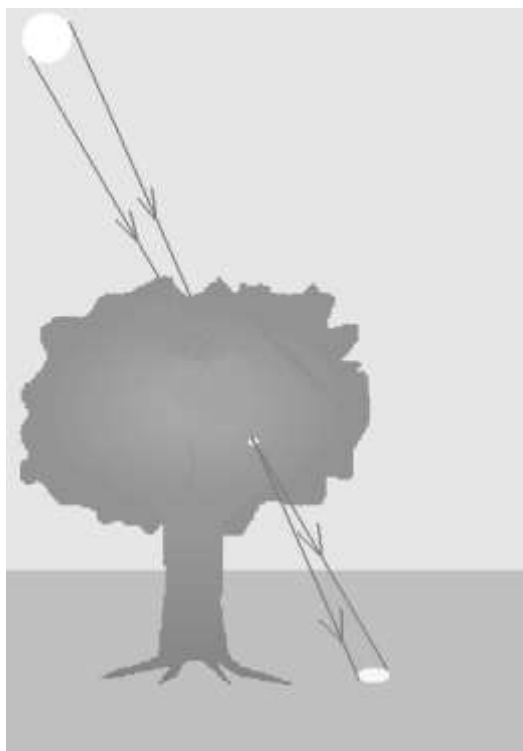


Figura 12 – A luz solar que passa entre as ramagens de uma árvore, incidindo no chão a uma distância grande comparada ao tamanho do orifício, determina uma imagem do disco solar.

Nota-se na figura 11 a ocorrência de manchas arredondadas, aproximadamente de mesmo tamanho, mas com brilhos diversos. Esse comportamento se deve a que o brilho dessas imagens é regulado pelo tamanho dos orifícios. As imagens com maior brilho estão associadas a orifícios maiores do que as imagens com menor brilho. Entretanto, o tamanho das imagens do Sol não depende do tamanho dos orifícios e, se estes estiverem igualmente distantes do local onde vemos as imagens, todas elas terão aproximadamente o mesmo tamanho.

mancha será tanto maior quanto mais inclinados em relação à normal ao anteparo estiverem os raios luminosos providos do Sol.



Durante os eclipses do Sol, as manchas luminosas produzidas pela luz que se infiltra através das folhas da vegetação e incide no chão ou nas paredes distantes das folhas, se apresentarão com a forma do disco solar eclipsado. Este belo efeito foi registrado durante o eclipse parcial do Sol em 11 de setembro de 2007 em Porto Alegre. A figura 13 é uma fotografia de uma miríade de imagens em uma parede próxima a uma árvore, obtida durante o eclipse (SILVEIRA e AXT, 2007).



Figura 13 – Miríade de imagens do disco solar eclipsado sobre uma parede.

A figura 14 mostra mais algumas imagens do disco solar em forma de lunas resultantes da passagem da luz na ramagem de uma árvore durante o eclipse e conjugadas sobre uma parede.



Figura 14 – Imagens do disco solar parcialmente coberto durante o eclipse.

Um pequeno espelho plano que reflete a luz do Sol em direção a uma parede distante comporta-se como o pequeno orifício de uma câmara escura. A diferença em relação ao orifício está em que os raios luminosos ao invés de atravessarem o “orifício”, são refletidos no espelho. Desta forma, consegue-se facilmente uma imagem do disco solar dirigindo a luz solar refletida pelo espelho contra um anteparo (SILVEIRA E AXT, 2001). Este procedimento pode ser utilizado para se observar os eclipses com segurança, evitando-se a necessidade de filtros para barrar a radiação ultravioleta. Além disso, se o objetivo for a simples observação visual do eclipse, um pequeno espelho plano substitui complicados procedimentos que utilizam binóculos, lunetas ou telescópios para obter uma imagem real do disco solar sobre um anteparo. A única condição para isso é que a distância ao anteparo seja muito maior do que as dimensões do espelho.

Na figura 15 vê-se uma imagem do Sol eclipsado, obtida com auxílio de um pequeno espelho plano com área de aproximadamente 1 cm^2 , que refletiu a luz solar sobre uma parede distante cerca de 5 m do espelho.

VI WORKSHOP PARANAENSE DE ARTE-CIÊNCIA
2015: Ano Internacional da Luz

4th INTERNATIONAL MEETING ON ART-SCIENCE
2015: THE INTERNATIONAL YEAR OF LIGHT

Universidade Estadual de Ponta Grossa - Ponta Grossa - Paraná

22 a 24 Setembro de 2015

Promoção:



Apoio:



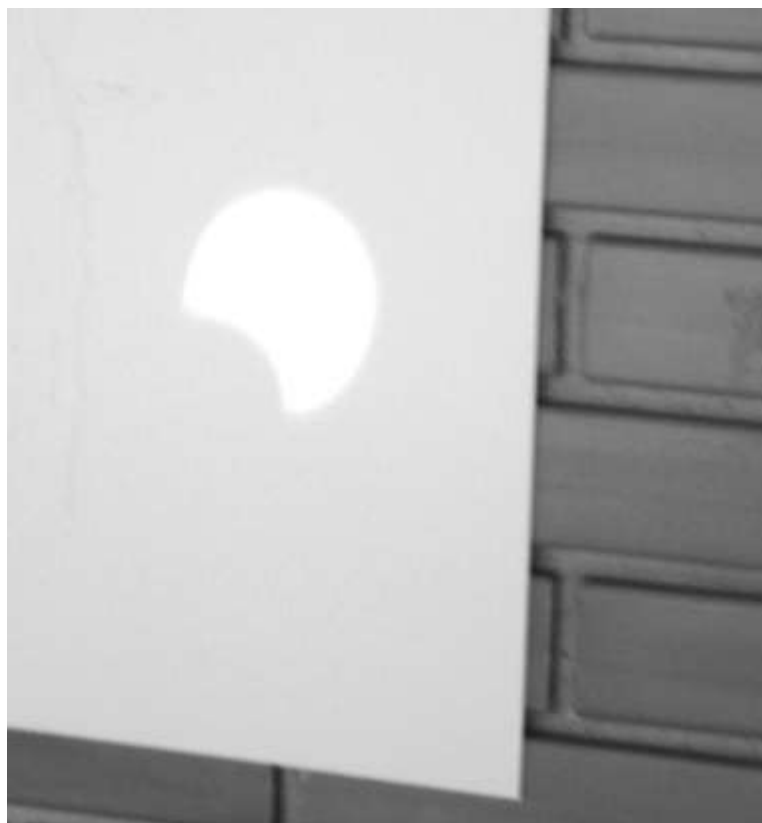


Figura 15 - Imagem do Sol eclipsado obtida com um espelho plano durante o eclipse de 11/09/2007 em Porto Alegre.

Mais detalhes sobre as imagens do disco solar são encontrados em SILVEIRA E AXT (2007).

5 - CONCLUSÃO

Neste artigo tratamos de três interessantes e contra-intuitivos efeitos que podem ser percebidos quando a luz proveniente diretamente do disco solar é barrada por objetos, determinando sombras. Justificamos teoricamente, ilustrando com fotografias e diagramas, cada um dos efeitos.

Apesar de os efeitos sempre acontecerem, eles são usualmente inusitados para as pessoas que não os conhecem e que não estão preparadas para a observação. Vale nesse contexto o que o filósofo da ciência Mario Bunge afirma (*Princípio Inverso de São Tomé*): é crer para ver! Ou seja, temos que saber da possibilidade de acontecerem todos estes efeitos para efetivamente observá-los.

REFERÊNCIAS

Promoção:



Apoio:



BERRY, A. *A short history of Astronomy*. New York: Dover Publications, Inc, 1961.

CASATI, R. *A descoberta da sombra*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

CHAISSON E. e McMILLAN, S. *Astronomy Today*, 2nd. ed., Prentice Hall Inc, 1997.

COPÉRNICO, N. *On the revolution of heavenly spheres*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1978.

HEATH, T. *Aristarchus of Samos – The ancient Copernicus*. New York: Dover, 1981.

HOSKIN, M. (ed). *The Cambridge Concise History of Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

KNILL, D., MAMASSIAN, P. e KERSTEN, D. *Geometry of Shadows*. *J. Opt. Soc., Am. A.*, v. 14, n. 12, p. 3216– 3231, 1997.

MOONHOAX. www.redzero.co.uk, 2003. Acessado em 30/07/2015.

MSSS (Malin Space Science Systems). Mars Global Surveyor – Mars Orbital Camera. San Diego: MSSS, 2001. http://www.msss.com/mars_images/moc/01_31_01_releases/cydonia/. Acessado em 30/07/2015.

NASA. Astronomy picture of the day, 1998. <http://apod.nasa.gov/apod/ap980407.html>. Acessado em 30/07/2015.

OLIVEIRA FILHO, K. S. e SARAIVA, M. F. O. *Astronomia e Astrofísica*. 2^a. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

SILVEIRA, F. L. As variações dos intervalos de tempo entre as fases principais da Lua. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n.3, p.330-307, 2001. http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v23_300.pdf. Acessado em 30/07/2015.

SILVEIRA, F. L. e AXT R. O que vemos quando projetamos a luz do Sol com um espelho plano: manchas luminosas ou imagens? *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v.18, n.3: p.364–375, dez. 2001. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6670>. Acessado em 30/07/2015.

_____ A “atração” entre as sombras! *A Física na Escola*, São Paulo, v.8, n.1, p.17-21, 2007. <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num1/v08n01a04.pdf>. Acessado em 30/07/2015.

_____ O eclipse solar e as imagens do Sol observadas no chão ou numa parede. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 24, n. 3: p. 353-359, dez. 2007. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6241>. Acessado em 30/07/2015.

SILVEIRA, F. L. e SARAIVA, M. F. O “encolhimento” das sombras. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 25, n. 2: p. 228-246, ago. 2008. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2008v25n2p228/5633>. Acessado em 30/07/2015.

SMART, W.M. *Text-Book on Spherical Astronomy*. 6th ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1960.

VERDET, J. P. *Uma história da Astronomia*. Rio de Janeiro: Zahar, 1991.

Promoção:



Apoio:

