



A “atração” entre sombras

Um intrigante fenômeno óptico

Quando a distância entre duas sombras se torna muito pequena, uma delas “atrai” a outra, deformando-a! Vejamos como esse fascinante fenômeno ocorre e pode ser explicado. Na Fig. 1, uma seqüência de fotos mostra a sombra da cabeça do fotógrafo se aproximando da sombra de uma parede, resultando na deformação da sombra da parede e o prematuro preenchimento do espaço antes iluminado.

Na Fig. 2, uma seqüência 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.

Embora a “atração” entre as sombras seja conhecida no teatro de sombras,¹ ela parece ser muito pouco conhecida entre os físicos. Ao demonstrarmos esse efeito para vinte e três colegas, professores universitários de física, apenas um o conhecia (lem-

.....
Fernando Lang da Silveira
 E-mail: lang@if.ufrgs.br

Rolando Axt
 Instituto de Física
 Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 Porto Alegre, RS, Brasil

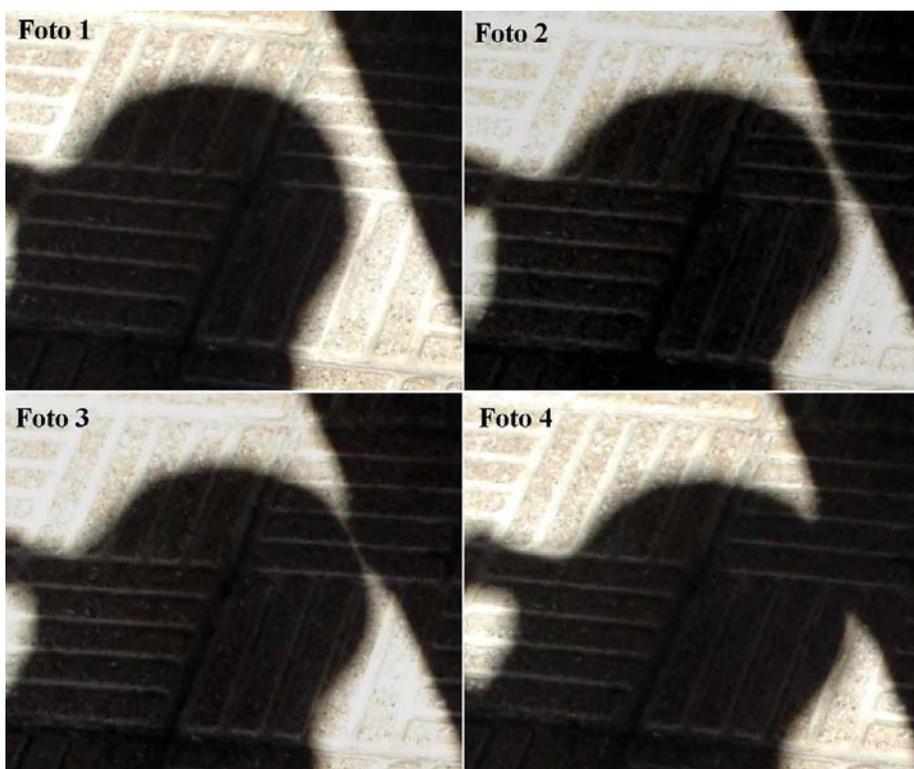


Figura 1. Projetada sobre a calçada, a sombra da cabeça do fotógrafo “atrai” a sombra da parede, deformando-a.

Um inusitado efeito ocorre quando a distância entre duas sombras se torna muito pequena: uma das sombras se deforma, como que atraída pela outra, preenchendo prematuramente o espaço que as separa. Apresentamos uma explicação geométrica para esse fascinante efeito, tendo por base o fato de que as fontes luminosas são extensas, produzindo sombras com bordas indefinidas, devido à penumbra.

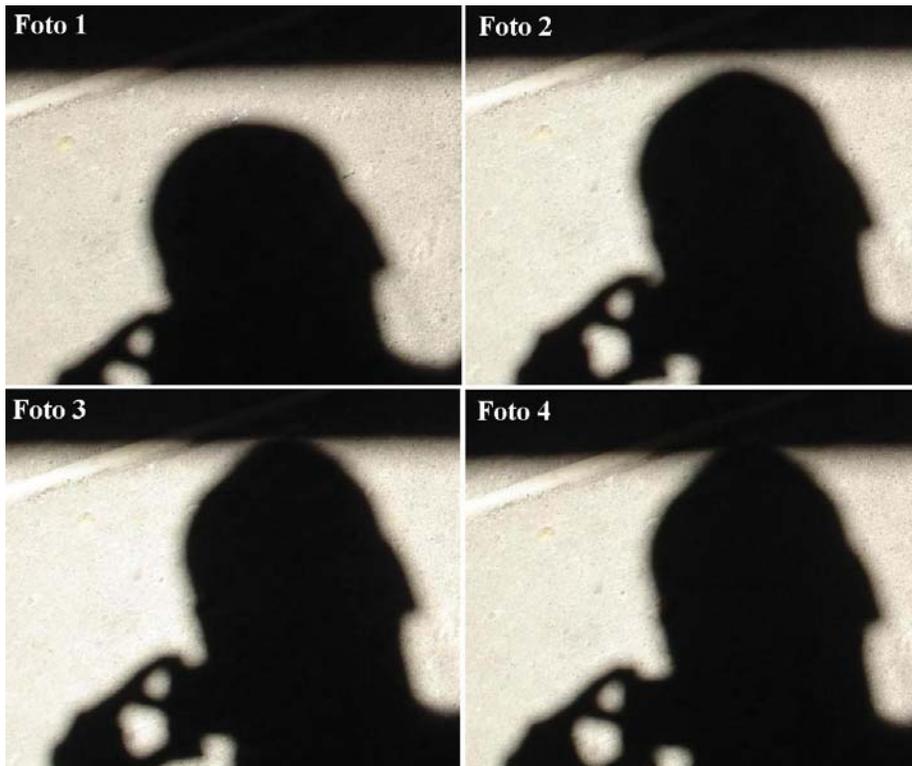


Figura 2. Projetada sobre a calçada a sombra da aba do alpendre “atrai” a sombra da cabeça do fotógrafo, deformando-a.

brando da sua infância a brincadeira de ‘espichar a sombra’; ele ignorava, entretanto, a razão de tal inusitado comportamento. Quando alguns dos colegas ensaiavam espontaneamente uma explicação científica, recorriam invariavelmente à difração e à interferência da luz.²

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 Fig. 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 Fig. 2, a situação se inverte: o chão estava mais próximo da cabeça do fotógrafo do que da aba do alpendre.

Fontes luminosas extensas produzem sombras com bordas indefinidas

O fato de o Sol ser uma fonte luminosa extensa que subtende, para

pontos situados na Terra, um pequeno ângulo de aproximadamente $0,5^\circ$, faz com que raios luminosos provenientes de regiões diferentes do disco solar incidam aqui na Terra segundo direções diferentes. Por isso as sombras produzidas por obstáculos que interceptam a luz solar não têm bordas bem definidas. As sombras só teriam bordas bem definidas se todos os

raios luminosos solares fossem paralelos entre si (o que se assume para fazer representações simplificadas da radiação solar) e então o fascinante fenômeno da “atração” entre sombras não ocorreria.

As Figs. 3a e 3b representam de maneira esquemática a luz emitida pelos extremos do disco solar, passando por um ponto da borda de um obstáculo e gerando uma região de penumbra (região dentro da qual a iluminação varia desde um mínimo – sombra – até a iluminação plena).

Na Fig. 3a a incidência dos raios solares que atingem o plano horizontal onde ocorre a sombra é quase perpendicular a este plano.³ A situação em que o Sol se encontra baixo no céu é apresentada na Fig. 3b. Comparando essa figura com a Fig. 3a, podemos observar uma maior extensão de penumbra sobre o plano horizontal.⁴ A rigor, em vez de usar um tom cinza claro para indicar o intervalo que corresponde à penumbra nas situações apresentadas nas Figs. 3a e 3b, deveríamos preencher esse intervalo com uma variação contínua entre o cinza escuro (sombra) e o branco (iluminação plena), ratificando a inexistência de bordas não definidas, como indicado na legenda dessas figuras.

A Fig. 4 representa, em uma escala conveniente, o aumento da iluminação solar, calculada sobre o plano onde é projetada a sombra, a partir do inte-

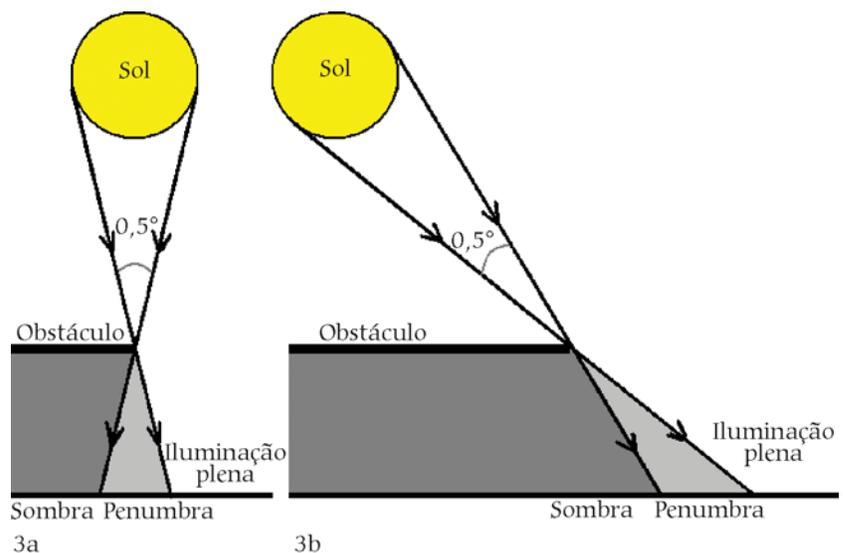


Figura 3. A luz solar que se origina em regiões diferentes do disco solar produz sombras com bordas não definidas (penumbra).

rior desta até a região de iluminação plena, em função da posição sobre uma reta neste plano, tal como esquematizado na Fig. 3. Entre as regiões de sombra e de iluminação plena, existe a penumbra, onde a iluminação varia proporcionalmente à área da parte do disco solar não encoberta pelo obstáculo. Abaixo do eixo horizontal das posições, na Fig. 4, representamos um obstáculo (indicado por um retângulo), juntamente com as partes por este encobertas, ou não, do disco solar, correspondente às seguintes cinco posições específicas do gráfico apresentado: o disco solar totalmente encoberto (sombra), três posições distintas de Sol parcialmente encoberto (penumbra) e ainda o disco solar totalmente exposto (iluminação plena).

A intersecção das regiões de penumbra produz a "atração" entre as sombras

A Fig. 5 representa dois obstáculos próximos um do outro e posicionados a diferentes distâncias do plano que contém as suas sombras, de tal forma que ocorra intersecção das regiões de penumbra associadas a cada obstáculo.⁵ Nesta figura representa-se a iluminação na região de penumbra (entre "Sombra 1" e "Sombra 2") por barras claras sobre um fundo cinza. O espaçamento entre as barras torna-se menor conforme a iluminação aumenta. Além disso, à semelhança do que visualizamos na Fig. 4, desenhámos também cada um dos obstáculos, juntamente com as partes expostas e encobertas do disco solar para diversas posições no plano que contém as sombras.

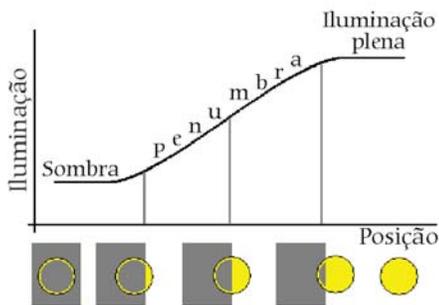


Figura 4. Variação de iluminação sobre diferentes regiões do plano onde a sombra ocorre.

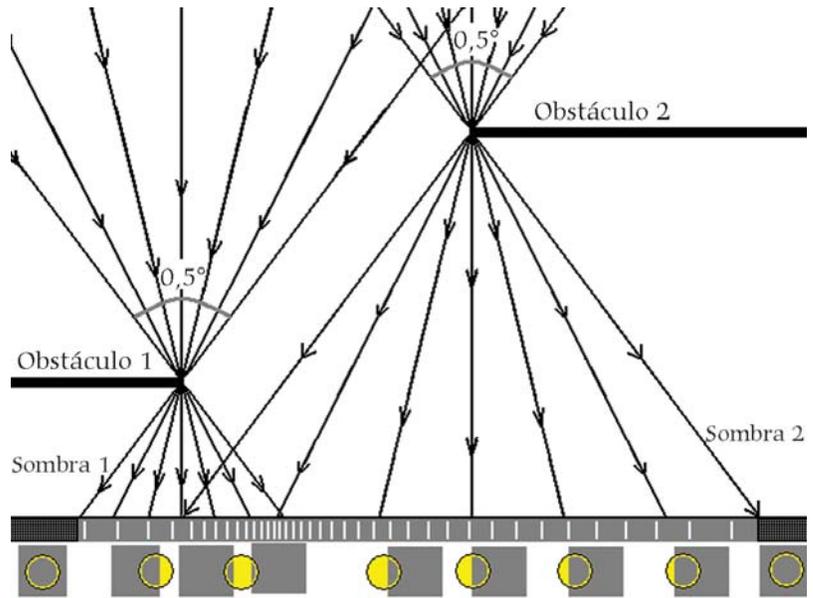


Figura 5. Dois obstáculos originando uma pequena intersecção entre regiões de penumbra.

A Fig. 6 representa obstáculos ainda mais próximos um do outro. Neste caso, o obstáculo 2 suprime raios luminosos no lado mais escuro da região de penumbra do obstáculo 1, contígua à sombra 1 original (representada na Fig. 5). Desta forma, a sombra do obstáculo 1 se amplia explicando-se assim a "atração" da sombra do obstáculo 1 pela sombra

do obstáculo 2.

É importante destacar que a construção geométrica na Fig. 6 implica necessariamente a ampliação da sombra projetada pelo obstáculo 1. É impossível que o mesmo efeito ocorra na sombra do obstáculo 2, pois seria necessária a supressão de raios luminosos próximos a essa sombra, o que é geometricamente injustificável.

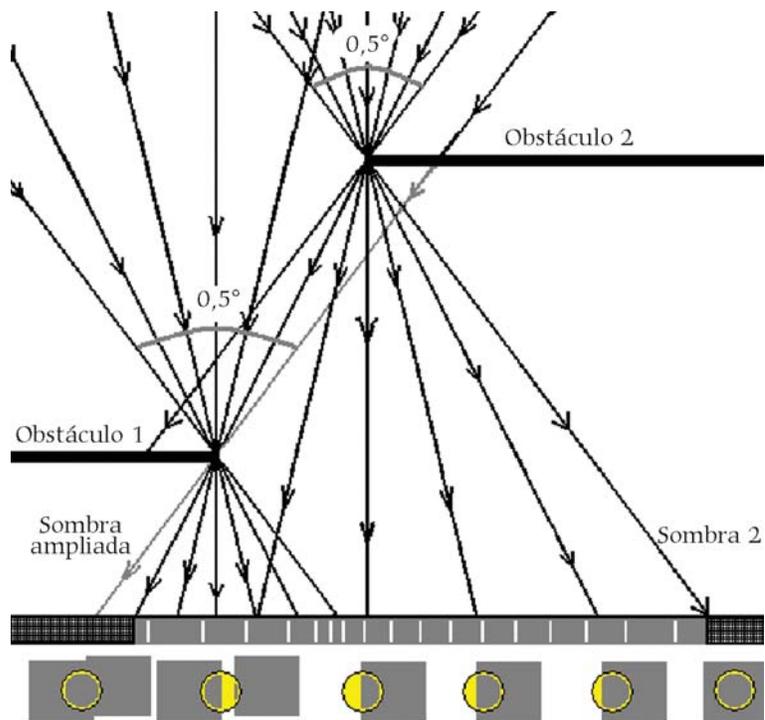


Figura 6. Devido ao aumento da intersecção entre as regiões de penumbra, a sombra que está mais próxima do seu correspondente obstáculo acaba sendo ampliada.

Explica-se assim, qualitativamente, o enunciado que denominamos *lei da "atração" entre as sombras*.

Curvas de iluminação no plano onde as sombras ocorrem

Uma abordagem quantitativa para a explicação da "atração" entre as sombras é possível com auxílio do traçado das curvas de iluminação no plano onde o efeito ocorre. O princípio subjacente ao cálculo dessas curvas é que a iluminação, em uma região do plano que contém as sombras e a penumbra, varia proporcionalmente à área do disco solar exposta (a parte do Sol não encoberta pelos obstáculos) para aquela região. Com base nesse pressuposto, calculamos e representamos as curvas de iluminação (Fig. 7), no plano onde as sombras ocorrem, para quatro posições relativas dos dois obstáculos, supondo que o obstáculo 2 se encontre três vezes e meia mais afastado da superfície onde as sombras são observadas do que o obstáculo 1. O obstáculo 2 avança para a esquerda (sua borda passando sucessivamente pelas posições A, B, C e D indicadas na parte superior da Fig. 7), paralelamente à superfície onde as sombras são observadas, enquanto o obstáculo 1 permanece parado em relação à origem do eixo das posições. Tomamos como unidade de medida de posição a metade da largura da região de penumbra que apenas o obstáculo 1 determinaria caso não existisse o outro obstáculo.

Vejam inicialmente, tomando por base as curvas de iluminação representadas na Fig. 7, o que acontece com a sombra do obstáculo 2. Quando este obstáculo avança paralelamente ao plano onde as sombras ocorrem, aproximando-se do obstáculo 1, a sombra 2 avança pelo mesmo espaço que o obstáculo 2 percorreu (para verificar isto, basta comparar as posições da borda do obstáculo 2, no topo da Fig. 7, com a posição do início da sombra 2 - início da linha de iluminação constante). Desta forma, este resultado teórico é consistente com o que se observa quando as duas sombras são aproxima-

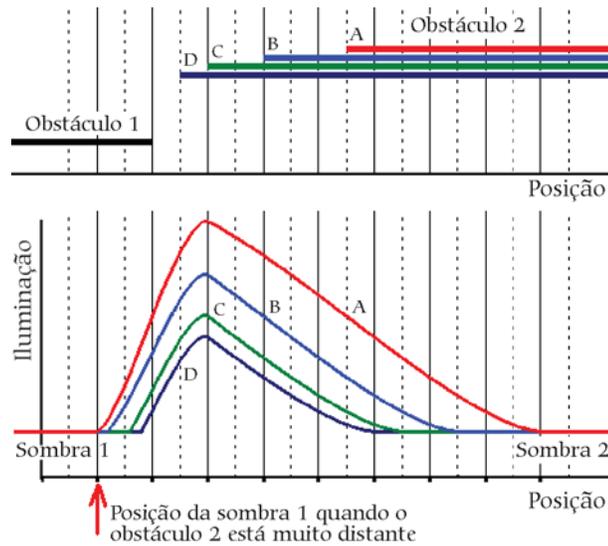


Figura 7. Curvas de iluminação no plano onde as sombras ocorrem para diversas posições relativas dos dois obstáculos.

das: uma delas, a sombra 2, avança sem sofrer modificações na sua forma.

A seguir vamos analisar o que ocorre com a sombra do obstáculo 1. As curvas de iluminação mostram que inicialmente, quando o obstáculo 2 se encontra mais afastado (posição A do obstáculo 2), a extensão da sombra 1 não é ainda afetada por esse obstáculo. Mas, quando o obstáculo 2 passa sucessivamente pelas posições B, C e D, nota-se que a linha que corresponde à iluminação constante no lado esquerdo da Fig. 7 (identificando a

sombra 1), avança para a direita, ou seja, a sombra 1 se amplia, deformando-se. Este resultado teórico, já antecipado qualitativamente na seção anterior, é consistente com o que se observa quando uma sombra se aproxima da outra (conforme as fotografias das Figs. 1 e 2): uma das duas sombras (sempre aquela que corresponde ao obstáculo mais próximo do plano onde o efeito ocorre) será "atraída" pela outra sombra, preenchendo prematuramente o espaço iluminado que separava originalmente as duas sombras.

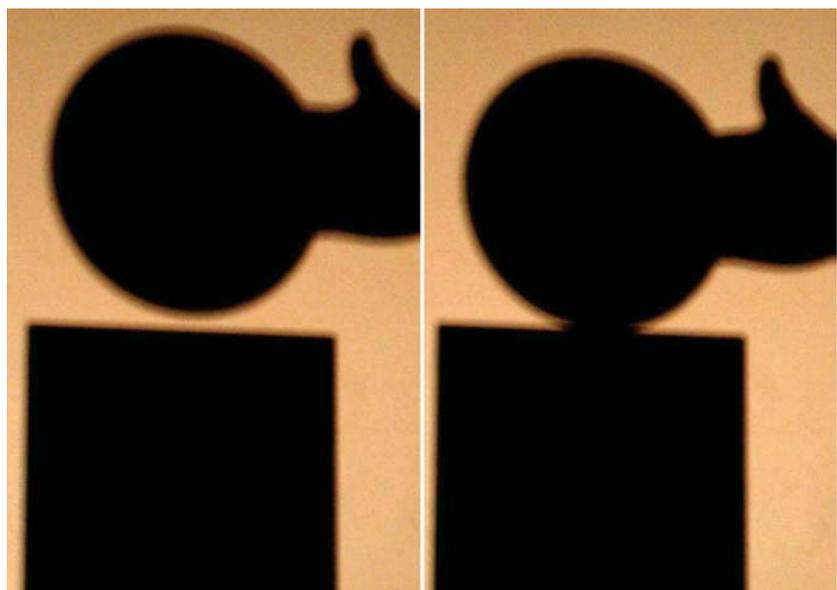


Figura 8. A sombra da placa é "atraída" pela sombra da bola.

A “atração” entre as sombras no laboratório

É possível também em laboratório se observar o fenômeno da “atração” entre as sombras. Em uma sala escura colocamos uma lâmpada e em uma parede do outro lado da sala fotografamos as sombras de objetos postados próximos à parede. A Fig. 8 apresenta as fotografias das sombras de uma placa e de uma bola, estando a primeira mais próxima da parede do que a segunda. Observa-se então

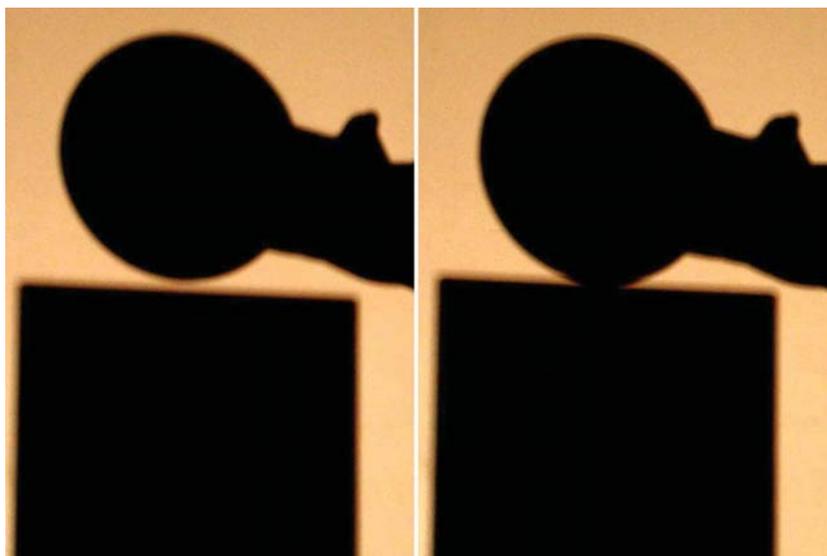


Figura 9. A sombra da bola é atraída pela sombra da placa.

a “atração” da sombra da placa pela sombra da bola.

Na Fig. 9 a sombra da bola é “atraída” pela sombra da placa, pois agora a bola encontra-se mais próxima da parede.

Conclusão

As sombras exercem um grande fascínio no homem desde épocas remotas, conforme conta Casati [1] em um texto imperdível para quem queira se inteirar sobre uma grande quantidade de fenômenos, apli-

cações e eventos históricos nos quais as sombras tiveram papel central. Mas o tema que discutimos neste artigo não é notado no livro de Casati, nem em diversos outros livros pesquisados. Na extensa obra de Minnaert [2], um clássico da literatura sobre luz e óptica ao ar livre, o efeito da “atração” entre as sombras não é sequer mencionado. Apenas em um texto paradidático sobre experimentos de física encontramos uma atividade de ‘espichamento de sombras’, cujo título poderíamos traduzir livremente do alemão como *O Nariz de Pinóquio* [3].⁶

Alertados por um aluno sobre o efeito de “atração” entre as sombras e tendo sido indagados sobre as suas razões, decidimos buscar uma explicação, agora concretizada neste artigo. Cremos que o apelo do inusitado que tal efeito apresenta pode servir de motivação (e tem servido em nossas aulas) para uma discussão profícua sobre óptica geométrica.

Agradecimento

Agradecemos à Prof^a Maria Cristina Varriale do IM-UFRGS pela leitura crítica deste artigo e pelas sugestões apresentadas.

Referências

- [1] R. Casati, *A Descoberta da Sombra* (Companhia das Letras, São Paulo, 2001).
- [2] M. Minnaert, *The Nature of Light and Colour in the Open Air* (Dover, New York, 1954).
- [3] J. Wittmann, *Trickkiste 1 - Experimente, wie sie nicht im Physickbuch stehen* (Bayerischer Schulbuch-Verlag, München, 1986).

Notas

¹Uma professora de física do ensino médio que faz teatro de sombras nos relatou ser o efeito conhecido e usado pelos

praticantes desta arte.

²Eles logo consideravam a explicação falsa ao serem alertados de que a distância entre os dois corpos que produziam sombras era muitíssimo maior do que o comprimento de onda da luz, condição essa que impede efeitos perceptíveis de difração.

³A incidência perpendicular dos raios de luz solar sobre o plano onde acontece a sombra é a condição para a menor extensão da região de penumbra, isto é, aproximadamente 0,9 cm para cada metro de distância entre o objeto que projeta a sombra e o plano.

⁴As fotos apresentadas nas Figs. 1 e 2 foram tiradas no final da tarde com o Sol baixo

no céu, sobre uma calçada horizontal.

⁵Para melhor compreensão, o ângulo máximo entre os raios de luz provindos do disco solar em todas as figuras está muito exagerado pois, conforme já notado, esse ângulo é de apenas 0,5°.

⁶Este autor apresenta uma explicação para o efeito do ‘espichamento de sombras’ que, em nossa opinião, não é suficientemente clara. Ela envolve aspectos objetivos da óptica geométrica, incorporando também detalhes subjetivos da percepção visual humana. A nossa explicação é completamente objetiva, consistente com o que se registra nas fotografias.