

Difração e o olho humano

Diffraction and the human eye

Otaviano Helene^{*1}, Ícaro Salerno Fernandes^{2,3}, Thiago Gonçalves dos Santos Martins⁴

¹Universidade de São Paulo, Instituto de Física, São Paulo, SP, Brasil.

²Secretaria Municipal de Saúde de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

³Universidade de São Paulo, Faculdade de Medicina, São Paulo, SP, Brasil.

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Ciências Médicas, Campus de Macaé, Macaé, RJ, Brasil.

Recebido em 07 de outubro de 2022. Revisado em 21 de janeiro de 2023. Aceito em 08 de fevereiro de 2023.

Este trabalho apresenta alguns aspectos da difração no olho humano, tanto na pupila como nas células do cristalino e em estruturas no seu interior. As deduções relevantes são feitas em um Apêndice. Para complementar o entendimento dos fenômenos ópticos, são examinados alguns aspectos fisiológicos do olho, especialmente da retina. O objetivo do trabalho é fornecer exemplos que possam ajudar no ensino da óptica e motivar os estudantes a examinarem mais detalhadamente a difração, incluindo cálculos numéricos. Os exemplos incluem a visibilidade de estruturas como a Muralha da China quando observadas de longas distâncias, os pingos dos is das antigas bulas de remédio, a forma de moscas volantes e a razão pela qual vemos estrelas com pontas. Este artigo tem como objetivo atingir não apenas físicos e estudantes de física, mas, também, profissionais de outras áreas relacionadas à visão humana, como oftalmologistas, optometristas e técnicos e tecnólogos em oftálmica.

Palavras-chave: Difração, Olho humano, Visão, Ensino de Física, Ensino de Medicina.

This work presents some aspects of diffraction in the human eye, which occurs in the pupil, in the cells of the lens, and in structures within it. An Appendix presents the calculations necessary to understand the phenomenon of diffraction. To complement the understanding of optical phenomena, some physiological aspects of the eye, especially the retina, are examined. The purpose of the paper is to provide teachers and students with examples that can help in the study of optics and motivate students to take a closer look at diffraction, including numerical calculations. Examples include the visibility of structures like the Great Wall of China when viewed from long distances, the dots of the letters i and j from the drug information leaflet the shape of floaters, and why we see stars as pointy objects. This article targets physicists, physics students, and professionals from other areas related to human vision, such as ophthalmologists, opticians, and optometrists.

Keywords: Diffraction, Human eye, Vision, Physics Education, Medical Education.

1. Introdução

Difração e interferência são fenômenos que ocorrem com qualquer tipo de onda, como ondas na água, sonoras, eletromagnéticas, sísmicas entre várias outras. Ondas de matéria, descritas pela mecânica quântica, também sofrem difração e interferência e, embora ainda sem comprovação experimental, parece haver difração também de ondas gravitacionais.

Difração ocorre tanto com ondas longitudinais, quando a variação da grandeza que vibra é ao longo da direção de propagação (como nas ondas sonoras), como com ondas transversais, quando a oscilação da grandeza é perpendicular à direção de propagação (como nas ondas na superfície da água ou nas eletromagnéticas, quando estas se propagarem longe de suas fontes).

A expressão difração é reservada para os fenômenos de interferência que ocorrem quando uma onda encontra um obstáculo, como a borda de um anteparo ou uma

pequena passagem. Em uma explicação simplificada, difração é o fenômeno de interferência que ocorre entre as ondas criadas a partir de cada ponto de uma mesma frente de onda.

A Fig. 1 mostra a difração de ondas na água, onde os obstáculos encontrados são as pequenas ilhas e as bordas da enseada. Nessa figura, a difração é perceptível comparando a forma das frentes de onda, quase retas antes de atingirem os obstáculos e curvadas logo depois disso. Ainda que tivesse apenas uma frente de onda na região, ocorreria a difração.

A intensidade e a forma da dispersão de uma onda eletromagnética provocada pela difração são calculadas usando a técnica de fasores [1] ou cálculos diretos que explicitam as características da onda ao se propagarem [2, 3]. O Apêndice apresenta uma demonstração simples do cálculo da intensidade da figura de difração no caso em que o anteparo onde a figura de difração é observada está distante do obstáculo que a provocou ou quando um sistema de lentes é usado para focalizar os raios luminosos em um anteparo não necessariamente

* Endereço de correspondência: otaviano@if.usp.br



Figura 1: Difração de ondas superficiais na água ao encontrarem alguns obstáculos, como as ilhas e as bordas da enseada.

distante. Essa é a chamada difração de Fraunhofer, em oposição à difração observada quando o anteparo está próximo do local onde a difração ocorreu (difração de Fresnel). Esse critério de proximidade depende do comprimento de onda da onda e das dimensões dos obstáculos e é discutido em alguns livros didáticos [2]. É interessante observar que a Ref. [2] é um dos poucos livros de física básica que tratam com algum detalhe quantitativo a difração de Fresnel.

O conteúdo do Apêndice é essencial para este trabalho. Se esse conteúdo não aparece no corpo principal do texto é para não o sobrecarregar, permitindo que ele possa ser lido por estudantes e profissionais de outras áreas, em especial aquelas ligadas ao estudo da visão humana, tais como oftalmologistas, optometristas e algumas profissões tecnológicas. Assim, o texto principal visa motivar o estudo do conteúdo do Apêndice, sem fazer com que as pessoas que estejam apenas interessadas por alguns fenômenos da difração encontrem uma barreira.

O principal objetivo deste texto é fornecer exemplos motivadores da difração da luz, alguns que aparecem em textos didáticos e alguns raramente explorados e explicados. A seção II apresenta algumas equações básicas da difração, necessárias para o entendimento dos exemplos, sendo que os detalhes teóricos são deixados para o Apêndice. A seção III mostra alguns exemplos mais familiares de difração e que podem ser explicados com base nas equações da seção anterior. Com isso, espera-se que os estudantes possam entender sem dificuldades os exemplos da seção IV, na qual aparecem os fenômenos de difração no olho humano.

Alguns dos exemplos da seção IV são pouco explorados em textos didáticos em português. A resolução angular da visão humana por causa da difração na pupila é da mesma ordem de grandeza da resolução provocada pela densidade de cones na fóvea, sugerindo uma certa consistência dos processos de seleção natural. O exemplo de difração nas moscas voantes é motivador e pode provocar algumas discussões e motivar estimativas

quantitativas por parte dos estudantes, inclusive porque muitos as veem. Vale lembrar que esses fenômenos entópticos dependem da distância entre a retina e as estruturas que provocam a difração, podendo corresponder à difração de Fraunhofer ou Fresnel.

A explicação da razão pela qual desenhamos estrelas com pontas e o cálculo quantitativo desse fenômeno apresentado no Apêndice, também parece um exemplo motivador, inclusive porque essa característica aparece em imagens de estrelas e outras estruturas luminosas obtidas por telescópios.

2. Difração por um Orifício Circular

Considere uma fonte monocromática de luz, muito distante de uma superfície opaca e plana, na qual há um orifício circular de raio a . A fonte está situada sobre um eixo perpendicular à superfície e que passa pelo centro do orifício (Fig. 2). Vamos nos restringir a uma situação na qual a fonte está suficientemente longe da superfície para que as frentes de onda possam ser consideradas planas ao chegarem ao orifício e a figura de difração seja observada em um anteparo muito distante do local onde ela ocorre – ou no plano focal de uma lente convergente. Nessas condições, a intensidade luminosa de um ponto situado em um anteparo paralelo à superfície que contém o orifício em relação à intensidade na direção frontal ($\theta = 0$) é dada por pela (veja Eq. (A6)),

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = 4 \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin \theta)}{k \cdot a \cdot \sin \theta} \right)^2, \quad (1)$$

onde k é o número de onda, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ é o comprimento de onda da luz, θ é o ângulo do desvio da luz em relação à linha tracejada após passar pelo orifício (veja a Fig. 2) e J_1 é a função de Bessel de ordem 1 [5].

Essa intensidade luminosa é mostrada na Fig. 3, tanto na forma gráfica como na forma que seria visualizada ou projetada em um anteparo. A figura de difração de uma fenda circular é formada por uma mancha clara central, também circular, cuja intensidade cai na medida em que examinamos ângulos laterais cada vez maiores.

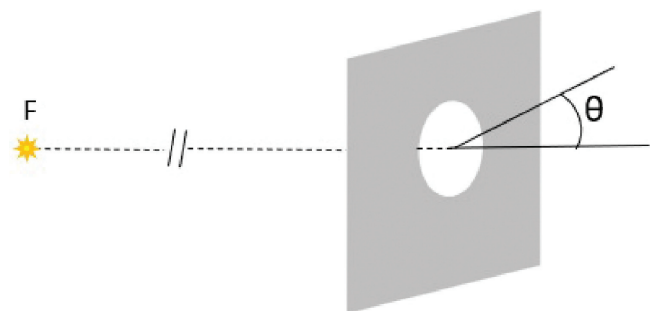


Figura 2: Os raios de luz originários de uma fonte luminosa F , muito distante do orifício, são praticamente paralelos. Nessa figura, esses raios incidem perpendicularmente ao anteparo onde está o orifício.

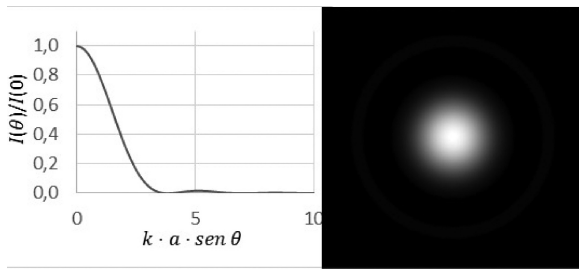


Figura 3: Esquerda: Intensidade relativa da luz proveniente de um ponto luminoso difratada por um orifício circular. Direita: Como vista se projetada em um anteparo. Esse anteparo pode ser a própria retina do observador se este observa o ponto luminoso olhando através de um pequeno orifício.

Quando a relação entre o ângulo de observação da difração (ou simplesmente ângulo de difração), o número de onda e o raio do orifício

$$k \cdot a \cdot \sin \theta \tag{2}$$

é igual a um dos zeros da função J_1 a intensidade luminosa no anteparo se anula. O menor desses zeros é 3,83 para um comprimento de onda de 500 nm, dentro da faixa visível, a difração provocada por um orifício de raio $a = 0,1$ mm, aquele ângulo corresponda a $0,17^\circ$.

Assim, um ponto luminoso, se observado por meio de um pequeníssimo orifício, aparecerá como um disco central iluminado cercado por uma região escura. Essa região escura é cercada, por sua vez, por uma região com alguma claridade, mas muito pouco intensa, não perceptível na escala da Fig. 3. Aumentando o ângulo de observação, os círculos claros e escuros vão se alternando e tornando cada vez menos perceptíveis.

Quando os ângulos são pequenos, $\sin \theta \approx \theta$ (θ em radianos), o ângulo correspondente ao primeiro mínimo de intensidade é dado por

$$\theta \approx \frac{3,83}{k \cdot a} = \frac{3,83 \cdot \lambda}{2 \cdot \pi \cdot a} \tag{3}$$

3. Alguns Exemplos de Difração

3.1. Difração por um orifício

A Fig. 4 mostra como seriam vistos os faróis de um veículo a cerca de 5000 m de distância através de um orifício de raio 1 mm (ou 500 metros e 0,1 mm, ou 50 quilômetros e um centímetro etc.).

3.2. Difração por uma fenda

A observação visual do efeito da difração da luz por uma fenda pode ajudar a perceber algumas de suas consequências práticas. A difração da luz por uma fenda estreita ocorre lateralmente em relação à sua orientação. Se a largura da fenda é a , a intensidade da luz difratada diminui à medida que observamos ângulos cada vez

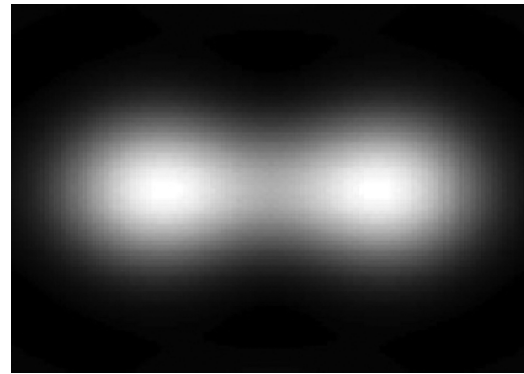


Figura 4: Como seriam vistos os faróis de um veículo a 5 quilômetros de distância quando observados através de um orifício circular com raio de 1 mm.

maiores e se anula quando

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{a} \tag{4}$$

onde $n = 1, 2, \dots$. A dedução dessa equação, bem como da intensidade da difração em função do ângulo, pode ser feita com o mesmo esquema usado no caso de um orifício circular mostrado no apêndice e encontrada nos livros didáticos [1, 2]. O primeiro mínimo de difração ocorre quando $n = 1$. Uma vez que os ângulos envolvidos são usualmente muito pequenos, podemos aproximar a função seno por seu argumento, como já fizemos; o primeiro mínimo lateral ocorre em $\theta \approx \lambda/a$.

A intensidade dos máximos locais da figura de difração cai à medida que os ângulos de observação aumentam, de maneira similar ao que ocorre com a difração por um orifício circular. Por causa disso, o máximo central se mostra mais relevante para a percepção de um objeto. Assim, se duas fontes luminosas separadas por um ângulo de aproximadamente λ/a forem observadas através de uma fenda, a difração fará com que o máximo da intensidade luminosa de uma delas se superponha ao mínimo da outra e suas imagens serão praticamente indistinguíveis. Esse efeito pode ser exemplificado pelo procedimento a seguir. A Fig. 5 mostra duas faixas vermelhas sobre um fundo preto.¹ Olhe para essas faixas através de uma fenda bem estreita, obtida, por exemplo, fazendo um corte com um estilete em um pedaço de cartolina ou qualquer outro material opaco. Desde que a distância entre as duas faixas vermelhas e a fenda seja suficientemente grande, a faixa preta entre elas ficará borrada por causa da difração da luz emitida pelas faixas vermelhas. (A fenda deve estar paralela às faixas.) Talvez seja necessário algum tempo para encontrar a melhor distância de observação e a melhor maneira de fazer a

¹ Quanto maior o comprimento de onda, mais intenso é o efeito de difração. A escolha da cor vermelha para as faixas é por causa do seu comprimento de onda, maior do que o das demais cores. Caso a cor fosse azul, por exemplo, o efeito seria mais difícil de perceber.

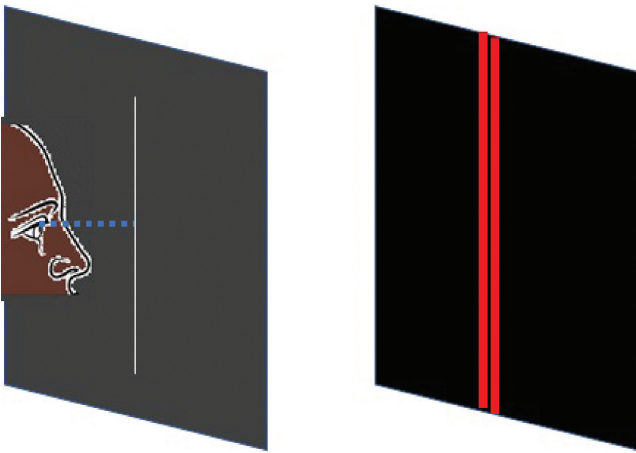


Figura 5: Se as duas faixas vermelhas forem observadas através de uma fenda muito estreita (paralela a elas), desde que a distância entre elas e a fenda seja suficientemente grande, a difração da luz “borrará” as faixas vermelha e escura. Se a fenda for colocada ortogonalmente às linhas vermelhas, a difração não comprometerá a nitidez da imagem.

fenda. Para isso, pode ser usada a própria Fig. 5, ou reproduzir a imagem em uma tela de computador.

Para que as faixas fiquem borradas, é necessário que $\lambda/a \approx l/D$, onde a é a largura da fenda, l é a largura da faixa escura entre as linhas vermelhas e D a distância entre o anteparo e a fenda. Neste caso, o comprimento de onda corresponde ao vermelho, um valor da ordem de 650 nm. Para perceber o efeito de difração, você deve procurar uma combinação de λ , a , l e D , o que pode exigir alguma paciência. Uma combinação possível e adequada para a formação de imagens usando telas de computador é $a \approx 0,2$ mm, $l \approx 3$ mm e $D \approx 1$ m.

A perda de nitidez das faixas é consequência da difração da luz vermelha pela fenda; girando esta última de 90° , de forma a ficar ortogonal à direção das faixas, a faixa preta ficará nítida.

3.3. Difração em telescópios e outros equipamentos

Vários equipamentos ópticos, como microscópios, telescópios e câmeras fotográficas, apresentam limitações em seu desempenho por causa de imperfeições ópticas das lentes, aberrações, perturbações na atmosfera no caso de telescópios etc. Entretanto, há uma imperfeição essencial que afeta muitos equipamentos e que não pode ser evitada: a difração da luz nas aberturas das lentes e espelhos do sistema.

Para orifícios circulares de diâmetro d , a resolução angular, ou seja, a abertura angular mínima que permite a distinção na visualização ou na projeção de dois pontos luminosos, é $\theta \approx 1,22 \cdot \lambda/d$ rad. Essa expressão é conhecida como critério de Rayleigh e corresponde à intensidade máxima de um dos pontos luminosos cair na região que a intensidade luminosa do outro ponto é

nula. Portanto, não conseguimos distinguir formato de objetos cujas aberturas angulares são inferiores a esse valor. Por causa disso, apenas alguns poucos (e recentes) telescópios permitem distinguir algumas (poucas) estrelas de um simples ponto luminoso. Vejamos isso.

A estrela mais próxima, com exceção do Sol, é a Próxima Centauri, distante pouco mais de 4 anos-luz da Terra, ou cerca de $4 \cdot 10^{16}$ m. Como essa estrela tem um diâmetro da ordem de $2 \cdot 10^8$ m, ela cobriria um ângulo de

$$\theta = \frac{2 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{16}} = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ rad.} \quad (5)$$

Para que tal estrela pudesse ter sua dimensão perceptível na imagem fornecida por um telescópio, seria necessário que

$$0,5 \cdot 10^{-8} > 1,22 \cdot \lambda/d. \quad (6)$$

Considerando o comprimento do espectro visível, entre 400 e 750 nm, o diâmetro d da lente ou do espelho desse telescópio precisaria ter dezenas de metros para que ele fosse algo diferente de um simples ponto ou um pequeno borrão.

Mesmo os maiores telescópios não têm sistema ópticos com tais dimensões. O Hubble, um dos grandes telescópios, em operação desde a década de 1990, e cuja característica principal talvez seja o fato que ele está em órbita e, portanto, permite observações sem a perturbação atmosférica, tem um diâmetro de 2,4 m. O telescópio James Webb, que opera também livre das perturbações atmosféricas, tem um espelho com diâmetro de 6,5 m. (composto de 18 espelhos menores). Nenhum desses dois telescópios formaria uma imagem de uma estrela, além do Sol, que fosse diferente de um ponto ou um borrão.

Cada um dos quatro grandes espelhos do Very Large Telescope (VLT), este operando na superfície da Terra, tem um diâmetro de 8,3 m e, portanto, também não teria resolução suficiente para revelar as dimensões da Próxima Centauri. Entretanto, desde 2000, aproximadamente, têm sido construídos observatórios com sistemas de vários telescópios afastados dezenas de metros uns dos outros e que podem operar simultaneamente e cujos sinais recebidos são coletados e recolhidos por um sistema eletrônico. Esse sistema, embora não aumente a resolução angular de cada telescópio, permite uma análise simultânea dos sinais recebidos em cada um deles, em particular de suas interferências. Normalmente, tais análises dependem também de tratamento numérico dos sinais obtidos. Assim, os vários telescópios funcionam como se fossem um grande telescópio com um espelho (ou uma lente) cujo diâmetro seria da ordem da distância entre eles. Graças a isso, a resolução angular do VLT é de 0,002 arcseg, o que corresponde à resolução de um telescópio com um diâmetro da ordem de 70 a 80 m. Mas como os vários espelhos estão distantes uns dos outros, a imagem talvez seja como a de um espelho quebrado cujos cacos, mas não todos, tenham sido colados. Assim,

a imagem formada, com uma resolução melhor do que aquela de cada um dos telescópios do sistema, está longe de ser boa. São sistemas como esse que permitem obter imagens, ainda que muito precárias, de algumas poucas estrelas, não mais do que duas dúzias delas no final de 2022.

4. O Olho Humano

O olho humano é um sistema óptico formado por uma quase esfera transparente, com diâmetro da ordem de 25 mm, variando de pessoa para pessoa e, também, segundo a direção (transversal horizontal, transversal vertical e anteroposterior). Considerá-lo como uma quase esfera, com uma pequena diferença de curvatura na córnea – sua porção frontal transparente –, é suficiente para o entendimento de suas principais características.

A córnea é um elemento óptico essencial do olho humano. Como os índices de refração das diferentes partes do olho – a córnea, a lente (ou cristalino) e os humores vítreo e aquoso – são bastante próximos do índice de refração da água, 1,33, é a curvatura da córnea o elemento mais importante para a formação de imagens nítidas na retina.

Na ausência da córnea, caso o olho fosse uma esfera transparente, a imagem nítida só poderia ser formada na retina se seu índice de refração fosse igual a 2; com um índice de refração da ordem de 1,33, o foco estaria na retina apenas se esta estivesse cerca de 2,5 cm além do final do olho [6–8].

Os processos evolutivos levaram ao surgimento de uma córnea [9], cujo raio de curvatura é da ordem de 6 mm, cerca da metade do raio de curvatura do olho. Isso faz com que ela possua uma característica óptica correspondente a 42 dioptrias, ou seja, uma distância focal de aproximadamente 2,4 cm, praticamente igual à distância entre a superfície externa da córnea e a retina.² Essa característica permitiria a formação de uma imagem nítida ou quase nítida na fóvea (região da retina com maior densidade de fotorreceptores).

O humor vítreo, composto de 99% por água, transmite 90% da luz com comprimento de onda entre 300 e 1400 nm e praticamente nada fora dessa faixa. Sua transparência é garantida pela baixa concentração de solutos macromoleculares e por células em sua periferia e seu índice de refração é da ordem de 1,34. Como o índice de refração do cristalino é da ordem de 1,40, sua função é apenas fazer o “ajuste fino” para focalizar a imagem na retina.

O olho é capaz de detectar luz em uma faixa de comprimento de onda entre 450 nm e 750 nm, aproximadamente. A detecção da luz ocorre por meio de células fotorreceptíveis, havendo dois grandes grupos delas. Um

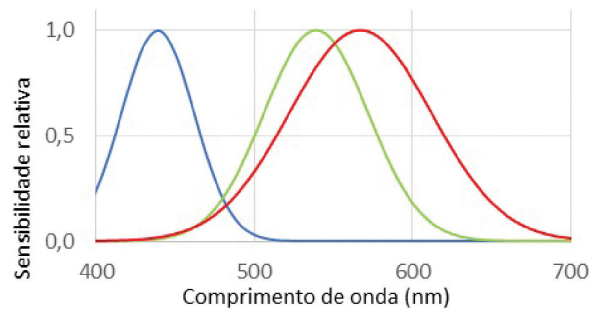


Figura 6: Sensibilidade relativa dos três tipos de cones aos diferentes comprimentos de onda.



Figura 7: Esquerda: esquema simplificado do olho para ilustrar a abertura angular correspondente à sensibilização de dois cones vizinhos. Direita: alguns detalhes da parte central da retina.

deles, os cones, permite a percepção de cores; o outro grupo, formado pelos bastonetes, responde apenas à intensidade luminosa. No caso dos cones, há três subtipos diferentes, um deles sensível a comprimentos de onda mais longos, com uma máxima sensibilidade próxima dos 560 nm; outro com máxima sensibilidade próxima a 530 nm; e um terceiro com maior sensibilidade em aproximadamente 420 nm (veja a Fig. 6).

Os cones são fortemente concentrados na região central da retina, a fóvea (Fig. 7), uma região de aproximadamente 1,5 mm de diâmetro. É essa região do olho que nos propicia, além da visão em cores, uma visão precisa, permitindo a leitura e a observação de pequenos detalhes.

A parte central dessa região, chamada foveola, tem cerca de 150.000 cones por milímetro quadrado. Isso significa que a distância média entre dois cones é da ordem de 1 ou 2 μm . Portanto, há uma abertura angular mínima entre dois pontos luminosos, o ângulo θ na Fig. 7, que sensibilizam dois cones vizinhos (fato que será explorado na seção 4.2).

Fora dessa região central da retina não há mais cones. Essa parte menos central da retina e sua periferia estão preenchidas pelos bastonetes, tipo de células inexistentes na sua parte central.

4.1. Difração na pupila

A pupila, aquela pequena janela transparente pela qual a luz penetra no olho, tem seu tamanho controlado por músculos que podem se contrair ou relaxar, permitindo

² Dioptria é o inverso da distância focal quando esta é medida em metro. Portanto, 42 dioptrias correspondem a uma distância focal de 2,4 cm.

regular a quantidade de luz que penetra no olho. O tamanho da pupila pode variar naturalmente entre um diâmetro de 1 mm em uma situação de grande claridade, até cerca de 8 ou 9 mm quando em um ambiente muito mal iluminado.

A pupila também responde com uma variação do seu tamanho em outras situações. Quando observamos um objeto de perto, ocorre a acomodação e a constrição pupilar, que causa uma diminuição do tamanho da pupila independente da iluminação. Pessoas mais idosas costumam ter uma diminuição natural do tamanho da pupila. Situações de estresse podem causar o aumento da pupila devido à ativação do sistema simpático.

A grande variação do tamanho da pupila apresenta dois problemas. Na condição de uma pupila muito dilatada, aberrações e defeitos de focalização, como miopia ou hipermetropia ainda que não muito importantes, têm suas consequências aumentadas. É por isso que pessoas que têm uma deficiência visual não completamente corrigida por lentes fecham os olhos parcialmente, reduzindo, assim, a abertura por onde a luz penetra e, também, as aberrações e os defeitos de focalização. Mesmo no caso de olhos emetropes, pupilas muito dilatadas, por exporem a periferia do cristalino, região com um poder de refração maior que o centro, causam aberração esférica. A aberração cromática também tende a diminuir com a constrição pupilar.

Quando a pupila se contrai muito, os efeitos descritos no parágrafo anterior são reduzidos, mas o problema da difração da luz passa a ser significativo. Considerado um comprimento de onda da luz de 555 nm (correspondente a uma cor entre o verde e o amarelo), aquela de maior sensibilidade fotóptica, a resolução da pupila, quando seu diâmetro for de 2 mm, é

$$1,22 \cdot \lambda/d = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \approx 0,02^\circ. \quad (7)$$

Essa abertura angular corresponde, aproximadamente, àquela dos símbolos da linha mais inferior dos quadros que os oftalmologistas usam para avaliar a capacidade visual de uma pessoa, quando observados a partir da distância adotada nos exames de acuidade visual.

Isso significa que um objeto cuja abertura angular de visão for da ordem de $0,02^\circ$ ou menor será percebido como um borrão de contorno mal definido. Da mesma forma dois pontos separados por um ângulo da mesma ordem não poderiam ser percebidos como tal; veríamos algo similar à imagem da da Fig. 4. Essa abertura angular corresponde à observação de um objeto da ordem de 3 mm a cerca de 10 m de distância.

4.2. Distância entre cones e a resolução angular

Com uma pupila com diâmetro de 2 mm, um ponto luminoso daria origem a um borrão circular na retina, formando um disco de Airy. Se esse ponto luminoso estiver bem distante do olho, cujo comprimento é da

ordem de 23 mm, esse borrão teria um diâmetro da ordem de

$$3,4 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \cdot 23 \text{ mm} \approx 8 \mu\text{m}. \quad (8)$$

Considerando a densidade típica de cones na região frontal da visão, cerca de 150 mil por milímetro quadrado, como já afirmado, um diâmetro como esse contém aproximadamente uma dezena de fotorreceptores. Como há três tipos de fotorreceptores, não há mais do que alguns poucos fotorreceptores sensíveis a uma mesma faixa de comprimentos de onda nessa região. Por exemplo, se a luz emitida por esses pontos tem um comprimento de onda de 450 nm (azul), um comprimento de onda que sensibiliza apenas um dos três tipos de cones (veja a Fig. 6), apenas alguns poucos receptores seriam estimulados. Isso significa que o limite inferior da abertura angular para que dois pontos luminosos de uma mesma cor fossem percebidos como tal, por causa da distância média dos cones, é da mesma ordem que a abertura angular mínima perceptível por causa da difração da luz.

Talvez seja possível dizer que, colocando à parte a questão da sensibilidade luminosa, de nada adiantaria uma maior densidade de cones na região frontal da retina, pois a limitação visual já estaria comprometida pela difração da luz na pupila. De forma similar, uma menor densidade de cones poderia comprometer a resolução angular permitida pela pupila. Em outras palavras, a resolução angular por causa da difração na pupila é equivalente à capacidade de separação angular propiciada pela densidade de cones na retina.

4.3. Cones e bastonetes

A visão frontal, cuja imagem é formada na fóvea, é aquela que permite observar detalhes, como aqueles necessários para a leitura confortável deste texto. Essa precisão não é devida apenas à densidade de cones nessa região, mas, também, ao fato que cada cone tem uma conexão única com o nervo óptico – que transmite a informação para o cérebro –, permitindo perceber que dois estímulos em lugares diferentes são de fato, dois sinais independentes.

Os bastonetes, células mais sensíveis à luz do que os cones, concentram-se na região periférica da retina e são ausentes na parte central da fóvea. Eles são importantes para a visão com pouca luz, mas não nos permite distinguir cores. Por isso nossa dificuldade para identificar cores quando há pouca luz. Essa região mais periférica da retina também não permite uma visão precisa das coisas, pois não há uma relação biunívoca entre os bastonetes e as fibras do nervo óptico. Consequentemente, pessoas que sofreram degenerescência macular e perderam a visão central não conseguem mais ler ou perceber coisas detalhadas.

A sensibilidade à luz dos bastonetes é de aproximadamente, em humanos, 100 vezes maior do que a dos

cones. É por essa razão que quando alguém quer ver uma fonte de luz muito fraca, como uma pequena estrela, ela não olha diretamente, mas lateralmente, para que a luz atinja a região periférica da retina, onde a concentração de bastonetes é maior.

4.4. Pingos nos is

As antigas bulas de remédio, bem como outros textos escritos, tinham letras cujo tamanho era da ordem de 1 mm. Assim, o pingo da letra *i* poderia ser tão pequeno quanto 0,1 mm. A cerca de 30 cm do olho, a abertura angular desse pequeno ponto seria de $3 \cdot 10^{-4}$ rad, ou seja, da mesma ordem de grandeza da abertura provocada pela difração da luz na pupila. Não fossem os movimentos sacádicos,³ a luz proveniente de um pingo das letras *i* ou *j* não sensibilizaria mais do que algumas células fotorreceptoras. Se a cor desse ponto for azul, não sensibilizará mais do que dois ou três cones. Ou seja, pessoas emetropes, lendo uma velha bula de remédio, poderiam não distinguir os pingos dos is e jotas.

4.5. Muralha da China

Durante algum tempo, o mito de que a Muralha da China seria vista do espaço – e mesmo da Lua – era frequentemente repetido. Mas isso é incorreto. A largura típica da Muralha da China não é maior do que uma dezena de metros. Considerando a resolução angular do olho, um objeto com tal dimensão só seria percebida a uma distância não maior do que algumas dezenas de quilômetros. A distâncias maiores do que essa, a Muralha da China se transformaria em um borrão indefinido entre os muitos outros borrões provocados pela luz refletida pelas montanhas e demais elementos da paisagem.

Da Estação Espacial Internacional, um satélite tripulado orbitando a Terra a cerca de 350 km de altitude, apenas as enormes obras humanas, com dimensões de pelo menos uma centena de metros, são visíveis por uma pessoa com visão 20/20.⁴ Isso inclui algumas das enormes construções, como a da usina hidroelétrica de Itaipu, cuja largura, na sua parte central, supera os 100 metros. As obras complementares e a espuma da água

vertendo podem facilitar sua identificação do espaço. Mas a Grande Muralha, cuja largura máxima não vai muito além dos 15 m, não está entre as coisas visíveis do espaço.

4.6. Moscas volantes

Um tipo de difração que enxergamos, algumas pessoas com mais frequência, outras, nunca ou quase nunca, é a provocada por estruturas que flutuam no interior do olho, no humor vítreo ou entre este e a retina. Essas pequeníssimas estruturas, da ordem de uma ou algumas dezenas de micrometros, chamadas de “moscas volantes”, são formadas por aglomerados de proteínas ou resíduos de células.⁵ Como elas estão relativamente presas ao restante do globo ocular, quando percebemos uma delas fora da visão frontal e movemos os olhos para procurá-la, elas parecem “voar” furtivamente. Essas estruturas têm dimensão da ordem de dezena ou dezenas de micrometros e, dependendo do exato local em que estão, são vistas como pontos, filamentos, objetos irregulares e com formas que podem lembrar fios torcidos ou linhas emaranhadas. A tonalidade dessas imagens varia entre o preto e o cinzento, ao projetarem sombras e penumbras na retina ou a provocarem difração da luz.

As moscas volantes ocorrem devido ao descolamento do vítreo posterior. Esse evento é mais comum em pessoas idosas, míopes, após cirurgias e inflamações intraoculares. Um terço dos pacientes pode desenvolver, como consequências delas, opacidades visíveis.

A hipótese que algumas imagens formadas por moscas volantes sejam frutos de difração foi proposta, talvez pela primeira vez, em um artigo de divulgação científica em 1962⁶ [10]. Nesse artigo, as dimensões desses corpos, quando flutuam diante da fóvea, foram estimadas em algumas poucas dezenas de micrometros, dimensão que pode ser confirmada por um experimento bem simples feito com o próprio olho [11].

As dimensões das moscas volantes e a distância destas à retina indicam que as figuras vistas devam corresponder à difração de Fresnel.

4.7. Por que desenhamos estrelas com pontas?

Uma estrela é um objeto esférico, como nosso Sol. Diferentemente do que ocorre com o Sol, as demais estrelas estão tão distantes que não podemos ver sua forma circular. Aos nossos olhos, na ausência dos fenômenos de difração, elas não seriam mais do que pontos luminosos. Com algumas pouquíssimas exceções, mesmo os

³ Nossos olhos fazem movimentos rápidos, da ordem de alguns graus, algumas vezes por segundo. Nosso cérebro faz uma espécie de ajuste ou de superposição das muitas imagens para formar um todo.

⁴ A acuidade visual é determinada pela menor imagem que pode ser identificada na retina. Para que dois pontos separados sejam percebidos pela retina, dois cones precisam ser estimulados e pelo menos um entre eles não deve sofrer estímulo.

A tabela de Snellen, aquela usada por oftalmologistas nos exames da visão, é construída com optotipos que formam um ângulo visual de 5 minutos de arco, com cada parte dele tendo 1 minuto de arco. A acuidade visual é expressa em uma fração cujo denominador representa a distância em pés ou metros em que as letras apresentem um ângulo de 5 minutos e o numerado indica a distância em que foi realizado o exame. Uma pessoa com visão 20/20 consegue enxergar até a oitava linha, de cima para baixo, da tabela de Snellen.

⁵ O surgimento de moscas volantes repentinamente ou em grande quantidade, em especial se associado a flashes, pode ser indicação de algum problema mais grave e um oftalmologista deve ser consultado rapidamente.

⁶ Um dos autores desse artigo, Harvey E. White, era físico, com importantes trabalhos em óptica, e o outro, Paul Levatin, um cirurgião que operou o primeiro de um descolamento de retina. Ambos tinham, portanto, motivos para se interessar pelas moscas volantes.



Figura 8: Imagem obtida pelo Telescópio Espacial Hubble. Fonte: verbete Diffraction spike, Wikipedia, consultado em agosto/2022.

mais poderosos telescópios não conseguem decifrar suas formas: elas também aparecem como pontos luminosos ou na forma de figuras de difração.

Sendo assim, por que as desenhamos as estrelas com pontas? A resposta é simples: porque as vemos assim, com pontas. E não apenas pessoas e animais veem estrelas com pontas; os telescópios também as registram dessa forma. A Fig. 8 mostra uma imagem de estrelas fotografadas pelo telescópio espacial Hubble, com pontas! De onde vem essas pontas?

Essas pontas, que obviamente não existem nas estrelas, são consequências de difração da luz no próprio sistema óptico. No caso de telescópios, como a que deu origem à imagem da Fig. 8, a difração ocorre nas palhetas que sustentam os espelhos. Tal fenômeno de difração também ocorre na abertura da objetiva de uma máquina fotográfica ou de um microscópio e mesmo no olho.

A Fig. 9 mostra a figura de difração da luz proveniente de um ponto luminoso quando esta atravessa um orifício circular contada por dois obstáculos, como mostrado na pequena figura inserido no lado superior. A imagem da foi obtida a partir da integração numérica da Eq. (A3), com os seguintes parâmetros: raio do orifício, 0,3 mm; largura das faixas opacas, 0,06 mm; comprimento de onda, 650 nm (correspondente à cor vermelha). A intensidade luminosa está em uma escala logarítmica,⁷ para permitir observar as manchas claras, que sugerem uma estrutura que lembra, ainda que vagamente, o desenho de uma estrela com pontas.

No caso do olho humano, a difração que nos faz ver estrelas com “pontas” é provocada por suturas ou ligações entre as células que formam nosso cristalino. A Ref. [12] é um trabalho que mostra imagens de um ponto luminoso na retina (como seria a imagem de uma estrela), incluindo os efeitos da difração da luz, tanto as

⁷ A escala da intensidade é igual ao logaritmo da soma de 0,01 à intensidade relativa do sinal.

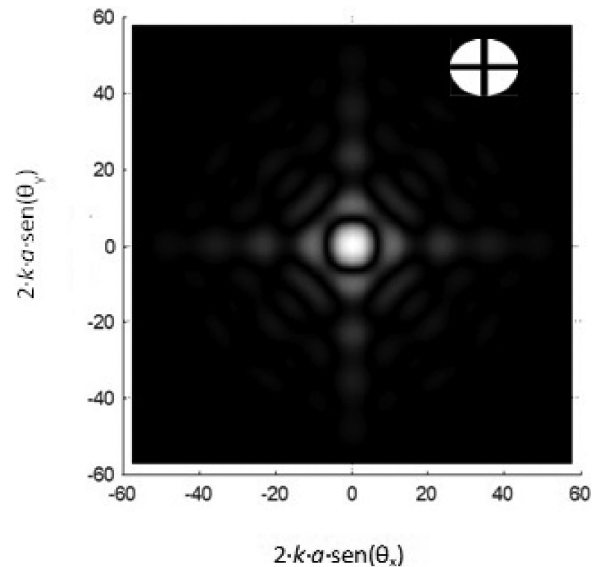


Figura 9: Imagem (escala logarítmica) da difração da luz por um orifício circular com duas faixas opacas. Figura inserida no campo superior direito: esquema do orifício e das faixas opacas.

descritas pelas pessoas, como as obtidas por fotografias e por cálculos numéricos. Todas essas imagens sugerem a existências de pontas.

A Ref. [4] mostra o interessante padrão das figuras de difração, obtidas por cálculo numérico, para diferentes distâncias entre a abertura e o anteparo. As figuras sugerem, como a Fig. 9, intensidades que podem ser percebidas como tendo pontas.

5. Conclusão

A análise dos fenômenos de difração na visão humana é bem mais difícil do que aquelas que obtemos nos experimentos e nas demonstrações didáticas. Entretanto, ela pode ajudar estudantes de física e estudantes e profissionais de outras áreas, em especial oftalmologistas, optometristas e tecnólogos na área oftálmica, a olharem a óptica de uma maneira mais abrangente e se motivarem pelo estudo da física.

Evidentemente, todos os fenômenos que discutimos também ocorrem nos olhos dos demais animais que têm olhos parecidos com os nossos, que são muitos [9]. Os animais cujos sistemas visuais diferem dos nossos também devem observar fenômenos de difração, mas talvez diferentes dos que observamos.

Os cálculos apresentados no Apêndice podem complementar aqueles encontrados nos livros didáticos. A ilustração da difração quando linhas opacas obstruem a passagem da luz em nossos olhos ou nos equipamentos ópticos, dando aos pontos luminosos suas formas estelares características, podem motivar estudantes a fazerem alguns cálculos numéricos, extrapolando as limitações típicas dos livros didáticos, quase sempre restritos às soluções analíticas.

Material suplementar

O seguinte material suplementar está disponível online:

Apêndice: Cálculo de figuras de difração.

Referências

- [1] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Física* (LTC, Rio de Janeiro, 1995), v. 2.
- [2] H.M. Nussenzveig, *Física Básica, Ótica, Relatividade e Física Quântica* (Edgard Blucher, São Paulo, 1998), v. 4.
- [3] M.L.L. Iannini, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **34**, 3309 (2012).
- [4] D.M. Reis, E.M. Santos e A.V. Andrade-Neto, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 2312 (2015).
- [5] G.B. Arfken, H.J. Weber e F.E. Harris, *Física Matemática – Métodos Matemáticos para Engenharia e Física* (Elsevier, Rio de Janeiro, 2017).
- [6] O. Helene, *The Physics Teacher* **48**, 142 (2010).
- [7] O. Helene e A.F. Helene, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 3312 (2011).
- [8] T.G.S. Martins, A.L.F.A. Costa, R.V. Martins, E.N. Martins, M.R. Alves, O. Helene e P. Schor, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 2303 (2014).
- [9] T.G. S. Martins, A.L.F. A. Costa, E.N. Martins, R.V. Martins e O. Helene, *Ciência Hoje* **52**, 26 (2014).
- [10] H.E. White e P. Levatin, *Scientific American* **206**, 119 (1962).
- [11] D. Keepports, *The Physics Teacher* **36**, 58 (1998).
- [12] R. Navarro e M.A. Losada, *J. Opt. Soc. Am. A* **14**, 353 (1997).