

Análise da luz circularmente polarizada produzida por um ser vivo

(*Analysis of circularly polarized light produced by a living creature*)

J. Flemming¹, C.A. Rosa²

¹*Departamento de Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil*

²*Graduanda em Licenciatura em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil*

Recebido em 8/6/2015; Aceito em 23/8/2015; Publicado em 12/12/2015

Analisamos a luz refletida por um escaravelho (*Phanaeus splendidulus*) de cor metálica iridescente que transforma luz não polarizada em circularmente polarizada à esquerda. Animais ou plantas que produzam este tipo de luz não são comuns, apesar desta particular espécie ser bastante disseminada no Brasil. Este fato somado à relativa facilidade de obter um polarizador e uma lâmina de quarto de onda acromática permitem esta demonstração experimental e a análise da polarização circular nos laboratórios de ensino. Comenta-se, também, sobre o biomimetismo e como nanoestruturas que ocorrem nestes insetos podem ser úteis para novas tecnologias em óptica.

Palavras-chave: luz circularmente polarizada, besouro, escaravelho, nanoestruturas, lâminas de onda.

We analyze the light reflected by an iridescent-metallic-color scarab (*Phanaeus splendidulus*) that changes non-polarized light into left-handed-circularly-polarized light. Animals or plants that produce this kind of light are uncommon, although this particular species is fairly widespread in Brazil. This fact, added to the relative ease of obtaining a polarizer and an achromatic quarter wave plate, allow the use of this demonstration experiment and the analysis of circular polarization in teaching laboratories. We also comment about biomimetism and the nanostructures that these insects show and how useful it can be for new technologies in Optics.

Keywords: circularly polarization light, beetle, scarab, nanostructures, wave plates.

1. Introdução

O estudo da polarização da luz é um capítulo importante no ensino da óptica física. Além disso, quanticamente, um fóton está univocamente definido pela sua energia, direção de propagação e polarização. Experimentos com esta última permitem uma visualização simples da estrutura lógica da física quântica [1]. Nos laboratórios de ensino, contudo, práticas com luz circularmente polarizada não são muito comuns. Mostramos aqui, com material de fácil acesso, uma forma como a Natureza produz este tipo de luz e como podemos analisá-la.

Nosso objetivo principal neste trabalho é mostrar como produzir e analisar luz circularmente polarizada, incluindo o sinal desta. A utilização de um caso raro de ser vivo que produz este tipo de luz, torna o processo mais interessante para o ensino. Discutimos, também, como ocorrem as interações ópticas com as nanoestruturas biológicas presentes neste ser vivo e que são responsáveis pelo fenômeno.

¹E-mail: flemming@uepg.br.

2. Produção e análise de luz circularmente polarizada com a lâmina de quarto de onda

Dizemos que uma onda eletromagnética plana monocromática é circularmente polarizada se, num ponto qualquer, o vetor campo elétrico mantiver seu módulo constante ao longo do tempo mas sua direção variar de forma que ele descreva periodicamente um círculo, com período igual ao da onda. Se, ao olharmos no sentido contrário ao de propagação da onda, o campo avançar no sentido horário, a luz é dita circularmente polarizada à direita. No sentido anti-horário, polarizada à esquerda. Esta é a convenção da maioria dos livros de óptica [2] e será utilizada neste trabalho. Observe que em mecânica quântica, astronomia e engenharia é adotada a convenção oposta [3, 4].

Como posso produzir e analisar luz circularmente polarizada? Considere um material onde a velocidade da luz, de frequência ω , dependa da polarização linear desta. Se o plano de polarização estiver em uma certa direção a luz caminhará mais rápido que aquela de po-

larização perpendicular. Estes materiais anisotrópicos existem (por exemplo, quartzo, calcita, mica, certos polímeros, etc.) e estes eixos perpendiculares são chamados de eixo rápido e eixo lento, respectivamente. Se o plano de polarização de luz incidente estiver a 45° do eixo lento, como mostrado na Fig. 1, a luz emergente poderá ser circularmente polarizada, com um ajuste adequado da espessura do material.

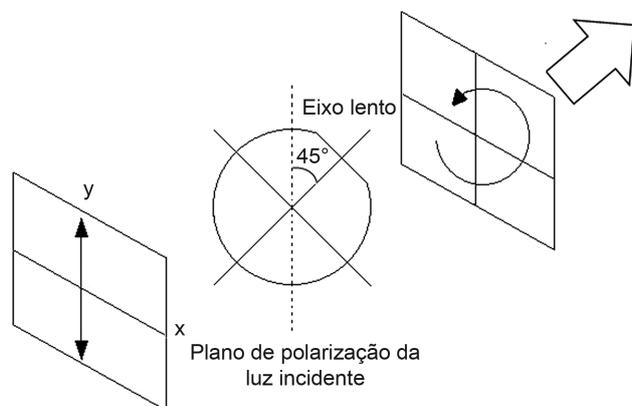


Figura 1 - Como uma lâmina de quarto de onda transforma luz linearmente polarizada em circularmente polarizada.

Pode-se ver isto fazendo a decomposição desta polarização (isto é, do campo elétrico desta luz) nas direções do eixo rápido e do eixo lento. Como a polarização está a 45° do eixo lento e, portanto, também a -45° do eixo rápido, as amplitudes do campo elétrico nas duas decomposições são iguais. Mas ainda, ao emergir do material, a componente rápida E_r estará adiantada com relação à componente lenta E_l . Se escolhermos convenientemente a espessura deste material, podemos deixar este avanço de fase igual a 90° (ou, o que é equivalente, a 450° , 810° , etc.). Assim a luz emergente do material pode ser descrita como

$$E_r = E_r^0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = E_r^0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

$$E_l = E_l^0 \sin(\omega t). \quad (2)$$

Como as amplitudes E_r^0 e E_l^0 são iguais, estas são as equações paramétricas de uma circunferência, com o tempo como parâmetro. Se, para simplificar, supusermos $E_r^0 = E_l^0 = 1$, podemos observar que elas descrevem uma circunferência trigonométrica, mas que gira no sentido horário, pois os eixos trigonométricos estão trocados. Ou seja, a luz emergente será circularmente polarizada à direita, como na Fig. 1. Se a luz incidente fosse linearmente polarizada perpendicularmente a esta que consideramos (ou seja, estivesse a 45° negativos do eixo lento), a luz emergente seria circularmente polarizada à esquerda. Chamaremos este dispositivo de lâmina de quarto de onda. Pelo descrito, pode-se avaliar que elas funcionem somente para um dado ω , isto é, para uma dada cor. No entanto, caso sejam feitas de polímero, é fácil deixá-las aproximadamente

acromáticas, ou seja, com comportamento idêntico em todas as cores. Isto porque a lâmina é ajustada para a cor verde (meio do espectro visível) e, no polímero, é pequena a variação dos índices de refração com ω .

3. Verificação que *Phanaeus splendidulus* produz luz circularmente polarizada e análise do sinal desta

É raro encontrar na natureza animais que produzam luz circularmente polarizada, seja por emissão, transmissão ou reflexão [5]. A primeira vez que se observou este tipo de luz em seres vivos foi em 1911 em certos escaravelhos (tipos de besouros), pelo físico laureado com o prêmio Nobel, Albert A. Michelson [6]. Além dos escaravelhos, o fenômeno ocorre também para algumas espécies de vaga-lumes [7], lagostas [8] e camarões [9].

A Fig. 2 mostra um escaravelho da espécie *Phanaeus splendidulus*, fêmea. Este e muitos outros besouros do mesmo gênero *Phanaeus*, são conhecidos vulgarmente como “rola-bosta”. Podem ser encontrados em áreas de pastagem no Brasil, Uruguai e Argentina e têm importante papel ecológico, pois ao juntarem e enterarem fezes, para fins reprodutivos, contribuem para a remoção de massa fecal, dispersão de sementes e eliminação de ovos de moscas e outros parasitas.



Figura 2 - Escaravelho *Phanaeus splendidulus* refletindo luz circularmente polarizada de sinais opostos em cada foto. A cor preta, do lado direito, significa ausência de luz refletida de um dado sinal. (Em cores na versão on-line).

A foto do lado esquerdo é a cor natural do animal e, a do lado direito, é preta. Nas duas, entre o besouro e a câmera, há um polarizador e uma lâmina de quarto de onda. A diferença é que em uma delas o ângulo entre o plano de polarização e o eixo lento é de $+45^\circ$ e, na outra, de -45° (não saberemos qual antes de analisar o sinal, que será feito a seguir). Logo, a câmera recebe luz circularmente polarizada (com sinais opostos de cada lado), refletida pelo besouro. A cor preta do lado direito significa que luz circularmente polarizada de um dado sinal não está sendo refletida.

Como analisamos experimentalmente a luz refletida por um besouro? Para uma onda plana, como estamos supondo, há sete possibilidades de polarização [10]: não

polarizada, linearmente polarizada, circularmente polarizada, elipticamente polarizada e misturas de não polarizada com os três tipos de polarização mencionados. O teste inicial consiste em simplesmente rodar o eixo de um polarizador (frequentemente marcado por um pequeno triângulo²) e observar se há variação da luminosidade refletida. Em caso negativo, como o nosso, restam três possibilidades: luz não polarizada, circularmente polarizada ou ainda uma mistura destas duas. Para dirimir a dúvida, introduz-se agora a lâmina de quarto de onda entre o besouro e o polarizador, e gira-se este último. Verifica-se então que a luz refletida é circularmente polarizada, pois, numa dada posição do polarizador, ocorre o completo bloqueio da luz (vide o lado direito da Fig. 2). Para descobrir o sentido da polarização circular localiza-se, no plano da lâmina de quarto de onda, o seu eixo lento.³ Nas de formato circular, este eixo está marcado por um pequeno chanfro na lateral da lâmina [11], como mostrado na Fig. 1. Nas de formato quadrado, em geral feitas de polímeros, ele é indicado pelo lado maior do retângulo que forma o adesivo de fábrica (Polaroid). Quando o exoesqueleto do escaravelho fica escuro, como mostrado do lado direito da Fig. 2, o eixo do polarizador e o eixo lento da lâmina estão a $+45^\circ$ ou a -45° . Não sabemos, ainda. Ao rodar o polarizador de $\pm 90^\circ$, o conjunto deixa passar a luz circularmente polarizada de sentido oposto, ou seja, aquela efetivamente refletida pelo besouro, como mostrado no lado esquerdo da Fig. 2. Para descobrir este último sentido, deve-se olhar contra o feixe luminoso e girar, mentalmente, o eixo óptico do polarizador em direção ao eixo lento da lâmina. O sentido que se faz isto (horário ou anti-horário) é o mesmo que o campo elétrico gira e nos dará, portanto, o sentido da luz circularmente polarizada (direita ou esquerda, respectivamente).

Pode-se justificar a regra acima observando-se a Fig. 1. A luz emergente, indicada pela flecha, é circularmente polarizada à direita. Suponha, agora, que o sentido de propagação da luz seja invertido. Agora a flecha (com o sentido invertido) representaria luz circularmente polarizada à esquerda, incidindo na lâmina de quarto de onda. Após a passagem pela lâmina, a luz estará linearmente polarizada no eixo x . Este raciocínio permite justificar a regra citada no parágrafo anterior, de como descobrir o sinal correto. No nosso caso da espécie *Phanaeus splendidulus* a luz refletida é circularmente polarizada à esquerda.

4. Como as nanoestruturas no *Phanaeus splendidulus* refletem a luz

Os besouros produzem luz circularmente polarizada de uma maneira diferente das lâminas de quarto de onda,

²Outra maneira é olhar inclinadamente um reflexo no vidro e girar o polarizador até sumir este reflexo. O eixo passante do polarizador será perpendicular a esta direção, no plano do polarizador.

³Para cristais uniaxiais positivos (quartzo) ele também é chamado de eixo óptico, nos negativos (calcita) ele é perpendicular ao eixo óptico e nos biaxiais (mica) há dois eixos ópticos inclinados em relação a este eixo lento. Eixo óptico é entendido aqui como sendo a direção na qual a velocidade da luz é a mesma para qualquer polarização.

descritas anteriormente. Primeiramente é por reflexão e não transmissão da luz. Outra diferença é que a luz incidente sobre o besouro é não polarizada (luz solar) enquanto na lâmina de quarto de onda ela precisa ser linearmente polarizada. Vejamos como ocorre o processo. Em um trabalho [12], feito com a espécie *Chrysina gloriosa* (outro escaravelho da família Scarabaeidae, como o nosso) mostra-se que o exoesqueleto deste inseto guarda semelhanças estruturais e ópticas com domínios formados em cristais líquidos denominados colestéricos [13]. Ou seja, como mostrado esquematicamente na Fig. 3, ocorre um depósito helicoidal de camadas de quitina, que é um polissacarídeo, de que é feito o exoesqueleto. Em cada camada, devido ao arranjo das fibras, temos uma anisotropia óptica como aquela dos materiais de que são feitas as lâminas de quarto de onda. Podemos imaginar uma pilha de finas camadas, com o eixo lento sendo continuamente torcido para cada camada sucessiva. Este arranjo nos besouros é semelhante ao de cristais líquidos colestéricos [14]. Estas helicoidais, quando todas no mesmo sentido e com o passo p da ordem do comprimento de onda da luz visível, farão que o exoesqueleto reflita luz com polarização circular (exclusivamente à direita ou à esquerda). O processo é uma reflexão de Bragg, ou seja, uma reflexão advinda da interferência construtiva entre dois ou mais feixes espalhados por uma estrutura regular. Se a incidência da luz for normal ao exoesqueleto e supondo que as velocidades no eixo rápido e no eixo lento não sejam muito diferentes (ou seja, os índices de refração associados a cada eixo sejam próximos), teremos a equação

$$\lambda = n.p, \quad (3)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz refletida, n é o valor médio dos índices de refração e p é o nosso passo da estrutura helicoidal no exoesqueleto. No próximo parágrafo justificaremos esta equação. Se a incidência não for normal ao exoesqueleto, pode-se mostrar que a luz refletida, embora mantenha a polarização essencialmente circular, passa a ter um comprimento de onda maior. Isto resulta no fenômeno da iridescência, ou seja, variação de cor de um objeto conforme o ângulo de observação. De fato, quando se inclina a vista, a cor da espécie descrita aqui passa do verde para o amarelo-esverdeado.

Vejamos como justificar a Eq. (3). Suponha a lei de Bragg para a reflexão de uma onda plana por um conjunto de planos paralelos [15]

$$2d \cos \theta = m.\lambda, \quad (4)$$

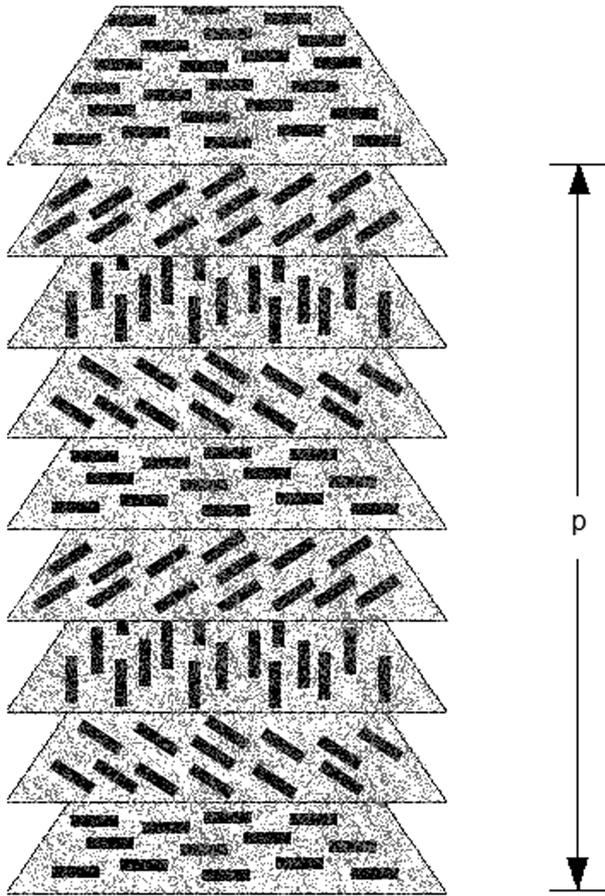


Figura 3 - Arranjo helicoidal, com passo p , das camadas anisotrópicas de quitina no exoesqueleto de um escaravelho.

onde d é a separação entre os planos, θ é o ângulo de incidência, m é a ordem de difração e λ o comprimento de onda da luz refletida (vide Fig. 4). Há reflexão seletiva apenas para o comprimento de onda λ devido à interferência construtiva entre as várias reflexões parciais em cada plano. Se a incidência fosse normal e tomássemos a primeira ordem, teríamos

$$2d = \lambda. \quad (5)$$

Se o espaço entre os planos, ao invés do vácuo, fosse preenchido por um meio transparente de índice de refração n , as interferências construtivas ocorreriam novamente desde que o caminho óptico permanecesse o mesmo. Isto aconteceria se λ fosse trocado por λ/n . A distância d entre os planos pode ser encarada como a distância em que este meio estratificado se repete. Observando a Fig. 3, podemos ver que a estrutura helicoidal do exoesqueleto se repete a cada $p/2$. Assim a equação ficaria

$$\frac{2p}{2} = \frac{\lambda}{n}. \quad (6)$$

Isto nos leva à Eq. (3), com n substituído pelo índice de refração médio, na aproximação de que o meio anisotrópico entre os planos possa ser trocado por um meio isotrópico, com propriedades médias.

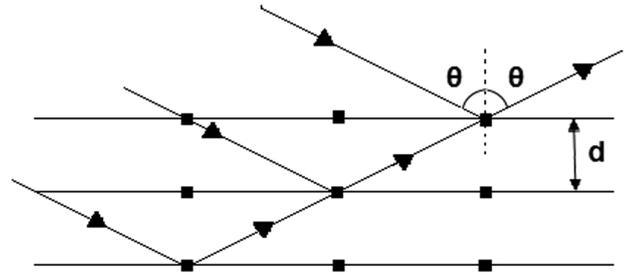


Figura 4 - Reflexão de Bragg em um conjunto de planos paralelos.

Ainda há que se explicar porque a luz refletida pelas estruturas helicoidais é circularmente polarizada. De nosso conhecimento não temos, como anteriormente, um modelo simples para apoio e daremos apenas a ideia matemática necessária à explicação [14, 4]. Utiliza-se a amplitude de espalhamento, que é um número complexo, cujo módulo ao quadrado é igual à seção de choque diferencial de espalhamento. Esta, por sua vez, quantifica a taxa de luz espalhada pelo exoesqueleto dentro de um dado ângulo sólido diferencial. O caráter vetorial da polarização da luz aparece na expressão da amplitude de espalhamento α específica deste caso

$$\alpha = f \cdot \varepsilon(\mathbf{q}) \cdot i, \quad (7)$$

onde f e i são matrizes linha e coluna que representam a polarização da luz espalhada e incidente respectivamente, e $\varepsilon(\mathbf{q})$ é a transformada de Fourier espacial do tensor dielétrico do material. Observe a necessidade do tensor devido à anisotropia da quitina. Neste cálculo da polarização, não podemos mais aproximá-la como isotrópica com propriedades médias, tal qual fizemos no parágrafo após a Eq. (6). \mathbf{q} é o vetor de onda de espalhamento, definido pela subtração do vetor de onda incidente \mathbf{k}_0 menos o vetor de onda espalhado \mathbf{k} . No caso da luz incidindo e espalhando normalmente ao exoesqueleto, ocorre a simplificação que \mathbf{q} , \mathbf{k}_0 e \mathbf{k} são todos paralelos à normal. O arranjo helicoidal da quitina no exoesqueleto é computado por um versor \mathbf{n} , chamado de diretor no estudo de cristais líquidos, que é inserido no tensor dielétrico com as seguintes componentes

$$n_x = \cos \beta, \quad (8a)$$

$$n_y = \sin \beta, \quad (8b)$$

$$n_z = 0, \quad (8c)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi}{p} \right) z + constante, \quad (8d)$$

com p sendo o passo da helicoidal, como indicado na Fig. 3 e o eixo z orientado na direção da normal. Mostra-se então que, para qualquer polarização incidente i , o único termo não nulo em $\varepsilon(\mathbf{q})$ e, portanto, em α e, portanto, na seção de choque diferencial e, portanto, na luz espalhada na direção normal são aqueles com polarização circular, com o mesmo sentido da helicoidal. Estes cálculos mostram também mais dois

detalhes. Primeiro que a luz refletida por estas helicoidais correspondem sempre a $m = 1$, na Eq. (4), sendo proibido outras ordens. Isto justifica a suposição que fizemos para chegar à Eq. (5). Segundo que, caso a luz incidente seja circularmente polarizada com o sentido da helicoidal, a luz refletida terá o mesmo sinal que a incidente. É o contrário do que ocorre em um espelho comum, onde a luz refletida é circular porém sempre com sinal trocado. Um caso não previsto acima é o da luz incidente ser não polarizada ou parcialmente polarizada. Precisaremos, nestas circunstâncias, refazer os cálculos utilizando os vetores de Stokes e as matrizes de Müller [16].

Uma estratégia aplicada atualmente de forma crescente é copiar muitas nanoestruturas e configurações macroscópicas da Natureza para o desenvolvimento tecnológico [17]. Este biomimetismo também ocorre em óptica, na coloração por espalhamento coerente [18], efeitos de polarização [19], anti-reflexo [20], lentes de super-resolução [21] e até no que temos descrito aqui: lâminas de quarto de onda acromáticas [22]. Mais especificadamente, a diversidade de espécies de besouros tem contribuído para inspirar soluções em cores estruturais formadas por interferência [23] ou aumento de brilho na cor branca [24]. Estima-se que existam cerca de 20 milhões de espécies diferentes de besouros, mas somente 2% delas sejam conhecidas [25].

5. Conclusão

Mostramos como um ser vivo é capaz de gerar luz circularmente polarizada pela simples reflexão da luz solar. É discutível a vantagem biológica de tal característica [26], embora as nanoestruturas presentes no seu exoesqueleto expliquem fisicamente o que ocorre, ao se estabelecer uma analogia com os cristais líquidos. Além de ser uma maneira simples de realizar um experimento didático para ensinar vários aspectos deste tipo de luz, o trabalho procura evidenciar uma conexão bonita da física com a biologia e a ciência dos materiais.

Referências

- [1] A. French and F. Taylor, *Introduction to Quantum Physics* (Chapman & Hall, London, 1994), p. 231.
- [2] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Pergamon Press, Exeter, 1991), 6^a ed., p. 28.
- [3] A. French and F. Taylor, op. cit., p. 262.
- [4] M. Faryad and A. Lakhtahia, *Adv. in Opt. & Photonics* **6**, 225 (2014).
- [5] G. Horváth and D. Varjú, *Polarized Light in Animal Vision* (Springer, Berlin, 2003).
- [6] A. Michelson, *Phil. Mag* **21**, 554 (1911).
- [7] H. Wynberg, E. Meijer, J. Hummelen, H. Dekkers, P. Schippers, *et al.*, *Nature* **286**, 641 (1980).
- [8] A. Neville and B. Luke, *J. Insect Physiology* **17**, 519 (1971).
- [9] S. Kleinlogel and A. White, *Plos One* **3**, 2190 (2008).
- [10] R. Longhurst, *Geometrical and Physical Optics* (Longman, Hong Kong, 1986) 3th ed., p. 552. Polarização radial e outras são possíveis com variação espacial na frente de onda. Vide: T. Brown, *Prog. in Optics*, **56**, 81 (2011).
- [11] http://search.newport.com/?q=*x2=sku{&}q2=05RP14-01 (veja em “drawings”). Observe que não há consenso, pois algumas vezes esta marcação é do eixo rápido: <http://www.edmundoptics.com/optics/polarizers/waveplates-retarders/quartz-waveplates-retarders/1911/>. Outras vezes parece que o próprio fabricante se confunde: <http://physics.stackexchange.com>, acesso em junho de 2015.
- [12] V. Sharma, M. Crne, J. Park and M. Srinivasarao, *Science* **325**, 449 (2009).
- [13] P. Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals* (Oxford, New York, 1995) 2^a ed., p. 263.
- [14] I. Teucher, K. Ko and M. Labes, *J. Chem. Phys.* **56**, 3308 (1972).
- [15] A. French and F. Taylor, op. cit., p. 42. Observe que a fórmula original envolve $\sin \theta$, pois se toma o complementar do ângulo de incidência.
- [16] W. Bickel and W. Bailey, *Am. J. Phys.* **53**, 468 (1985).
- [17] C. Sanchez, H. Arribart and M. Guille, *Nature Materials* **4**, 277 (2005) e <http://ngm.nationalgeographic.com/2008/04/biomimetics/clark-photography>, acesso em junho de 2015.
- [18] W. Chung, J. Oh, K. Kwak, B. Lee, J. Meyer, *et al.*, *Nature* **478**, 364 (2011).
- [19] S. Berthier, J. Boulenguez and Z. Balint, *Appl. Phys. A Mat. Sci. & Processing* **86**, 123 (2007).
- [20] A. Parker and H. Townley, *Nature Nanotechnology* **2**, 347 (2007)
- [21] E. De Tommasi, A. De Luca, L. Lavanga *et al.*, *Optics Express* **22**, 27214 (2014).
- [22] N. Roberts, T. Chiou, N. Marshall and T. Cronin, *Nature Photonics* **3**, 641(2009).
- [23] T. Lenau and M. Barfoed, *Adv. Eng. Mat.* **10**, 299 (2008).
- [24] B. Hallam, A. Hiorns and P. Vukusic, *Appl. Optics* **48**, 3243 (2009).
- [25] A. Seago, P. Brady, J. Vigneron and T. Schultz, *J. Royal Soc. Interface* **6**, 165 (2009).
- [26] M. Blaho, A. Egri, R. Hegedues. *et al.*, *Physiology & Behavior* **105**, 1067 (2012).