

## Enxergando no escuro: a física do invisível

O mundo ao nosso redor está repleto de informação e a cada dia que passa ela é cada vez mais produzida e disponibilizada. Para que nos atualizemos e estejamos sempre conectados e integrados com a sociedade, precisamos saber processar estas informações que recebemos e selecionar o que pode nos ser útil e nos fazer crescer.

Por questões de sobrevivência,<sup>1</sup> no decorrer da evolução de nossa espécie, aprendemos a captar e a processar as informações que chegam até nós. Essas atividades só são possíveis graças aos nossos órgãos sensores e ao nosso sistema nervoso, que juntos compõem os nossos cinco sentidos. É sabido que nossos sentidos são limitados, isto é, não apresentam respostas a todas as faixas de estímulo externo a que estamos submetidos. Podem-se citar os casos da audição e da visão humanas.

Nossos órgãos auriculares, responsáveis pela audição, são sensíveis a ondas mecânicas como o som, de frequências na faixa de 20 Hz a 20.000 Hz. A faixa de intensidades de ondas mecânicas que conseguimos ouvir varia de pessoa para pessoa, mas geralmente, o nível mais baixo é da ordem de  $10^{-12}$  W/cm<sup>2</sup> e o mais alto (quando chegamos ao 'limiar de dor'), é de 1 W/cm<sup>2</sup>. Porém, fora dessas faixas, ainda existem ondas mecânicas que não percebemos. Um exemplo bem conhecido de onda sonora fora de nosso alcance auditivo é o ultra-som, com frequência

acima de 20.000 Hz, usado em exames médicos de ultrassonografia e sentido por animais como cães, golfinhos e morcegos.

A visão humana, sensível às ondas eletromagnéticas, também está restrita a uma faixa pequena de frequências e intensidades. O espectro eletromagnético, mostrado na Fig. 1, nos dá a ideia da variedade de ondas eletromagnéticas existentes na natureza. Dentre as ondas que conhecemos, que vão desde os raios- $\gamma$ , as de mais alta energia, até as ondas de rádio/TV, as de mais baixa energia, só conseguimos captar a região denominada 'visível', que vai do violeta ao vermelho.

Apesar de não enxergá-la, o ser humano é capaz de captar a radiação eletromagnética através de sensores artificiais e, com isso, utilizá-la em diversas aplicações. Exemplos comuns em nosso cotidiano são o forno de microondas, aparelhos de imageamento por raios-X, telefone celular, rádio, televisão, sensores de presença, etc.

Em resumo, conseguimos captar os estímulos externos que nossos órgãos naturais não conseguem perceber através de sensores apropriados e, através da informação recebida por eles, utilizar esses estímulos para um fim útil [1-3].

Neste artigo propomos alguns experimentos com o objetivo primário de auxiliar a introdução experimental ao espectro eletromagnético, em particular a região infravermelha. A segunda intenção

.....  
**Daniel Neves Micha**<sup>1,2,4,\*</sup>,  
**Germano Maioli Penello**<sup>2,4</sup>,  
**Rudy Massami Sakamoto**  
**Kawabata**<sup>3,4</sup>, **Teo Camarotti**<sup>3,4</sup>,  
**Guilherme Torelly**<sup>3,4</sup> e  
**Patrícia Lustoza de Souza**<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Petrópolis, RJ, Brasil

<sup>2</sup>Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Reio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>4</sup>Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Nanodispositivos Semicondutores, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

\*E-mails: [micha@if.ufrj.br](mailto:micha@if.ufrj.br); [danielmicha@hotmail.com](mailto:danielmicha@hotmail.com)

.....

### Propriedades gerais das ondas

Para ondas harmônicas, podem-se definir algumas grandezas gerais, devido ao seu caráter periódico:

- Comprimento de onda ( $\lambda$ ): distância entre dois ciclos;
- Período ( $T$ ): intervalo de tempo entre dois ciclos;
- Frequência ( $f$ ): o inverso do período. Taxa temporal com a qual a onda se propaga;
- Velocidade de propagação ( $v$ ): velocidade com a qual a energia e o momento são transferidos de um ponto a outro. Essa grandeza é o vínculo entre as propriedades espaciais e temporais das ondas:

$$v = \lambda / T = \lambda \cdot f.$$

Apresentamos técnicas de imageamento no infravermelho, que possibilitam ver no escuro e medir as temperaturas de um corpo ou de um ambiente. Alguns experimentos são propostos com o objetivo de auxiliar a visualização desse tipo de radiação, que está fora da faixa que conseguimos enxergar, e, por isso, dizemos invisível. O grande diferencial desses experimentos é uma câmera fotográfica digital modificada, que permite observar fenômenos no infravermelho próximo. A facilidade de acesso, o baixo custo dos componentes e a familiaridade com os materiais envolvidos nos experimentos fazem-nos acessíveis a qualquer pessoa. Esperamos que o leitor se torne um multiplicador desses conhecimentos, irradiando-os para seus amigos, alunos e familiares.

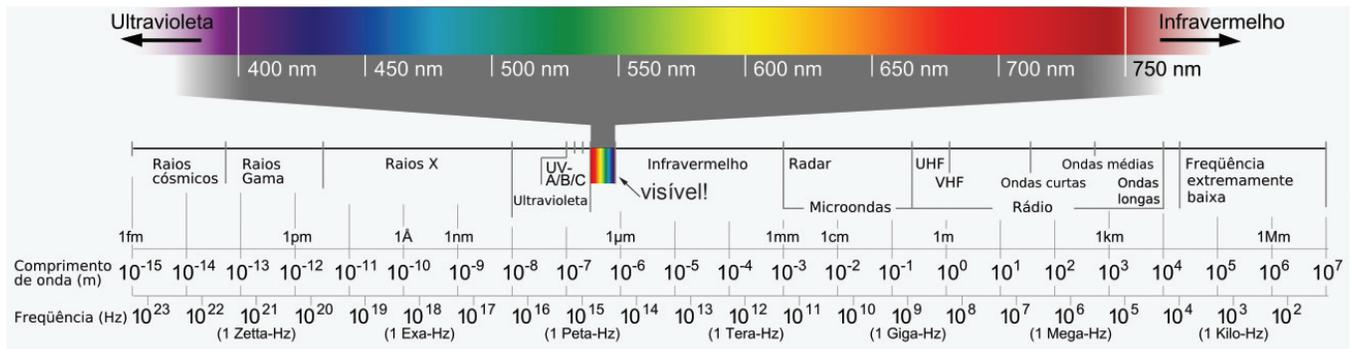
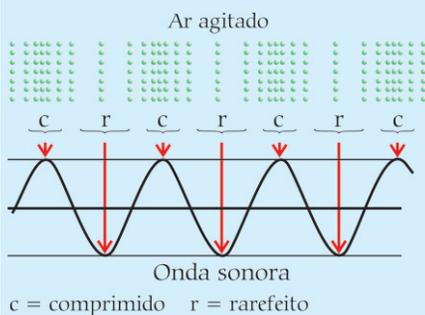


Figura 1 - Espectro eletromagnético.

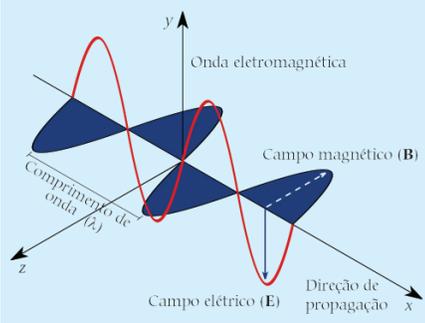
### Ondas

Na natureza, existem dois tipos conhecidos de ondas: as mecânicas e as eletromagnéticas. Em ambas, há a transferência de energia e momento de um ponto a outro do espaço, porém de formas bem diferentes.

As ondas mecânicas são perturbações que se propagam ao longo de um material. Isto ocorre devido às propriedades elásticas do mesmo: uma vez que um elemento do material é deslocado de sua posição original ele tende a retornar, deslocando o elemento seguinte. Quando este novo elemento deslocado retorna, desloca o seguinte e, assim, sucessivamente, criando um perfil de deslocamentos que se propaga no material. Um exemplo de onda mecânica presente em nosso dia-a-dia é o som.



As ondas eletromagnéticas são geradas por perturbações dos campos eletromagnéticos no espaço. Isso pode ocorrer quando uma carga elétrica é acelerada ou uma corrente elétrica é acionada. Um exemplo de onda eletromagnética muito comum é a luz.



do artigo consiste em exemplificar a utilização dessa radiação no cotidiano e, assim, tornar o leitor mais familiar com as tecnologias vigentes.

### Como “ver” o invisível

Existem diversas maneiras de se detectar a radiação infravermelha. No experimento original que comprovou a existência dessa radiação [4], simples termômetros foram posicionados em todo o espectro visível da luz do sol, bem como após a região do vermelho, como pode ser visto na Fig. 2b. Curiosamente, o termômetro colocado nesta última região registrou a maior temperatura, indicando que havia alguma radiação após o espectro visível pelo homem. Essa radiação foi batizada inicialmente de calorífica e posteriormente (no século XIX) de infravermelho.

Assim como no caso dos termômetros, há outras formas de detectar a radiação infravermelha baseadas na mudança de alguma propriedade física dos mate-

riais. Uma classe particular de materiais, chamados semicondutores, é muito utilizada para esse fim. Eles possuem a característica de modificar suas propriedades elétricas quando submetidos a radiação. Dentre os materiais semicondutores, o que mais se destaca, por seu uso comercial, é o silício (Si). Além de ter um custo baixo, ele é conveniente para aplicações onde se deseja detectar a faixa de radiação do visível (400 nm a 700 nm) e do infravermelho próximo (700 nm a 1400 nm) por possuir absorção deste tipo de radiação nesta faixa de comprimentos de onda [6] (Fig. 3b). Uma aplicação direta das propriedades ópticas do Si é a utilização desse material em sistemas de imageamento no visível, ou seja, as tão populares câmeras fotográficas digitais.

Além do silício, existem diversos materiais semicondutores que tornam possível a detecção da radiação infravermelha. Normalmente, eles ocupam a família IVA ou combinações das famílias IIA, IIIA, VA e VIA da tabela periódica (Fig. 4). Exemplos típicos são [7]: o germânio (Ge), o arseneto de gálio (GaAs), o fosfeto de índio (InP), o telureto de cádmio (CdTe), etc. Cada um desses materiais tem uma faixa específica de absorção de radiação, o que faz com que cada um sirva a uma aplicação específica, sendo uma delas o imageamento térmico, responsável pelo mapeamento de temperaturas de um corpo ou ambiente.

### Experimentos que permitem “ver” o invisível

Para sair da teoria e entrar um pouco na prática, recomendamos alguns experimentos [8-11]. Os materiais necessários para sua execução são de fácil obtenção e muito simples de serem feitos.

O experimento 1 ajuda a demonstrar que apesar da radiação infravermelha não ser muito conhecida fora dos meios técnicos, é bastante utilizada em nosso cotidiano e é, também, o princípio da visão noturna. Já o experimento 2 demonstra a existência da radiação infravermelha

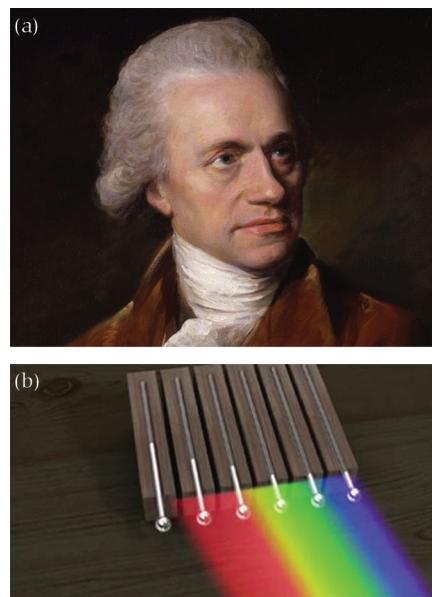


Figura 2 - (a) William Herschel. (b) Representação do experimento original que permitiu à William Herschell a descoberta do infravermelho [5].

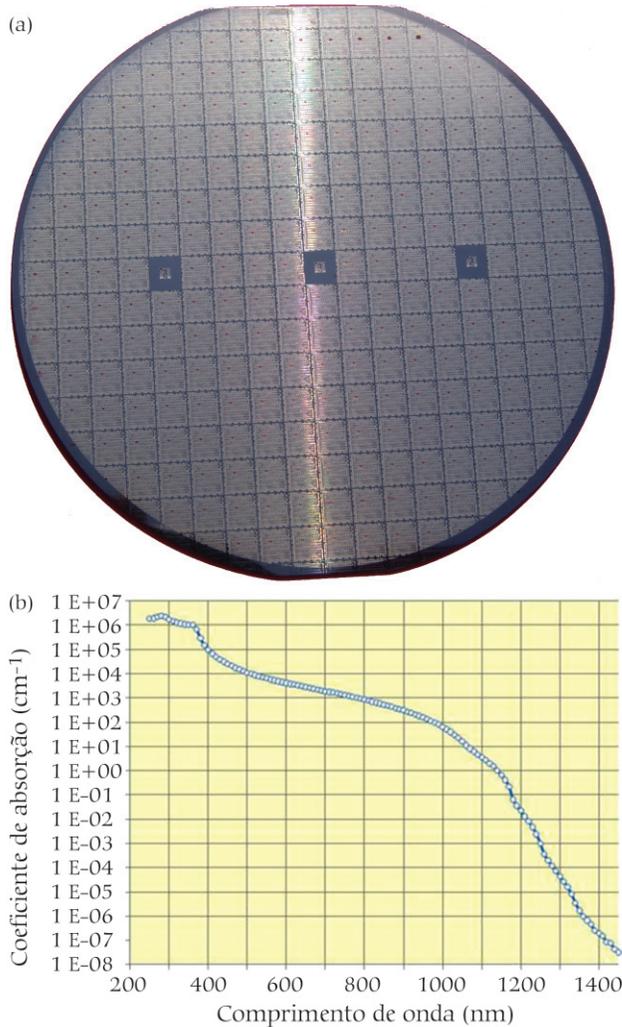


Figura 3 - (a) *Wafer* de silício, geralmente usado para fabricação de dispositivos eletrônicos [5]. (b) Espectro do coeficiente de absorção do silício, indica como se dá a absorção de luz pelo silício para diversos comprimentos de onda [6].

IA	Elementos de transição																3A	4A	5A	6A	7A	8A
1 H																	B	C	N	O	F	Ne
2 Li Be																	B	C	N	O	F	Ne
3 Na Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4 K Ca																	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5 Rb Sr																	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6 Cs Ba																	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7 Fr Ra																	Pb	Bi	Po	At	Rn	
8 La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu								
9 Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw								

Figura 4 - Tabela periódica dos elementos. A área demarcada dentro da linha vermelha indica os elementos que formam sólidos semicondutores.

presente em fenômenos naturais, tais como o arco-íris, porém simulada através de meios artificiais análogos.

### Experimento 1: "visão noturna"

Através desse experimento conseguiremos demonstrar a existência da luz infravermelha emitida por um diodo emissor

de luz (*LED*, do inglês "Light Emitting Diode") e fazer observações no escuro. Como já discutido anteriormente, a luz infravermelha é invisível ao olho humano. O que faremos para poder enxergá-la é apontar um dispositivo sensível a essa radiação que a traduzirá em informação compreensível a nós. Isso será feito com

uma câmera fotográfica digital de computador (*webcam*) modificada e a informação processada aparecerá na tela de um computador, permitindo que vejamos o invisível.

Para que a *webcam* seja sensível tanto ao visível quanto à radiação infravermelha, o filtro de infravermelho foi retirado (um guia de como fazer essa etapa é apresentado no Quadro 1). Ela é conectada ao computador e, após instalação dos *drivers*, imagem como uma câmera de vídeo. Neste momento, a câmera já é sensível ao infravermelho, mas a imagem observada é dada muito mais pelo visível. Por esse motivo, colocamos na frente da câmera um filtro de luz visível. Materiais que podem ser utilizados para tal fim são o material magnético presente no interior de um disquete *floppy 3,5"* e um negativo totalmente revelado de filme de máquina fotográfica. Os materiais necessários para essa experiência podem ser vistos na Fig. 5.

Ao acionar um *LED*, como se faz ao pressionar um botão de um controle remoto, gera-se radiação na faixa espectral do infravermelho. Quando visualizado por nós, aparentemente nada acontece, já que não enxergamos a radiação emitida pelo *LED*. Estamos diante de uma radiação invisível. Porém, quando apontamos o mesmo *LED* para a *webcam* modificada, vemos a fonte de radiação acionada, como pode ser visto na Fig. 6. Estamos, então, "vendo o invisível". Na verdade, o sensor de silício contido na câmera está nos traduzindo esta radiação invisível, tornando-a visível através da conversão dessa radiação em um sinal elétrico que é enviado ao computador e depois transformado em imagem.



Figura 5 - Materiais utilizados na montagem do experimento 1.

Agora, faça o seguinte: apague as luzes do ambiente em que se encontra e aponte o controle e a câmera para um objeto ou até mesmo para você. Mantenha pressionado um botão do controle remoto, de modo a emitir sua radiação. Você verá o objeto ou, no caso de ter apontado para si próprio, você na tela do computador, mesmo sem a presença de luz visível. Dessa forma, você estará enxergando no escuro! Veja o exemplo dessa proposta na Fig. 6-b, quando os autores apontaram o LED para si próprios.

### Experimento 2: "enxergando a luz invisível além do vermelho"

Com esse experimento, demonstra-se a continuidade do espectro eletro-



Figura 6 - Experimento mostrando a existência de luz invisível (radiação infravermelha). (a) O LED de um controle remoto, cuja radiação não pode ser enxergada pelos olhos humanos, é identificado por uma webcam. (b) O LED e a webcam são apontadas para um objeto ou pessoas em uma região não iluminada por luz visível, permitindo ao observador ver no escuro.

magnético após a última cor visível - o vermelho. Ao separar o espectro de cores de uma fonte de luz branca, como uma lanterna de filamento, por exemplo, através de um fenômeno dispersivo (refração, difração), observam-se as cores do arco-íris. O interessante é que após o vermelho existe mais radiação, mas não a vemos. Nesse experimento, utilizamos um DVD para dispersar as diversas componentes de uma fonte de luz branca, como num arco-íris artificial, e através da webcam modificada percebemos a radiação não visível ao olho humano. Os materiais utilizados nesse experimento podem ser vistos na Fig. 7.

Em um ambiente escuro, aponte a luz branca da lanterna para um DVD e observe seu espectro devido ao fenômeno da difração. Na região onde se visualiza o espectro decomposto, coloque um anteparo para uma melhor visualização. A olho nu, as cores visíveis são observadas dispersas como em um arco íris. Um exemplo pode ser visto na Fig. 8.

Após o vermelho nenhuma cor é observada a olho nu no espectro da luz branca. Porém, nessa região existe radiação, o infravermelho, que não pode ser vista pelo olho humano. Aponte a webcam alterada para essa região. O resultado, isto é, a imagem apresentada no computador será parecida com a da Fig. 9-a, onde podemos ver que surge um clarão branco após a cor vermelha. Esta é a radiação

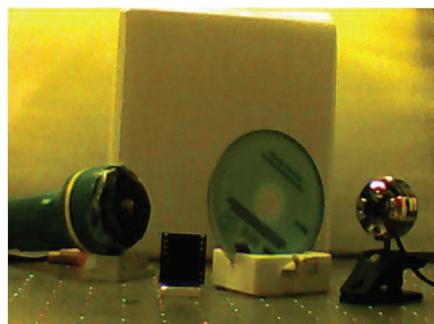


Figura 7 - Equipamentos utilizados na montagem do experimento 2.

infravermelha emitida pela lanterna e que está sendo capturada pelo sensor da câmera. É a luz invisível que agora podemos enxergar. Para não deixar nenhuma dúvida de que este clarão é radiação infravermelha, fizemos uma sequência de fotos inserindo um filtro de luz visível, o negativo revelado de um filme fotográfico (similar ao usado no experimento anterior), na frente da lanterna. Na Fig. 9, podemos ver a sequência da inserção do filtro de luz visível no caminho óptico do feixe de luz e a consequente imagem que é formada. A sequência mostra que a radiação visível é cortada pelo filtro, mas, ainda assim, o clarão branco após a cor vermelha continua existindo. Agora, tente você.

Com esses experimentos, esperamos que você, leitor, tenha se convencido da existência de luz fora da faixa que enxergamos e entenda um pouco mais do mundo ao seu redor. Esperamos também que você se torne um multiplicador dessas



Figura 8 - Decomposição da luz branca de uma lanterna por um DVD através do fenômeno da difração. Fotografia obtida com uma câmera convencional cujo filtro de infravermelho não foi removido.

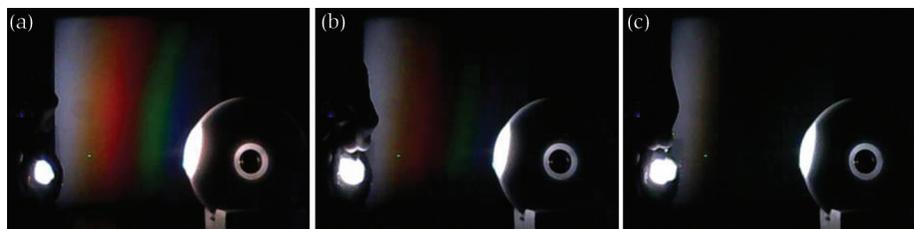


Figura 9 - Sequência de fotografias do experimento 2 retiradas com a webcam "alterada": luz branca de uma lanterna é difratada por um DVD gerando a divisão de seu espectro visualizada no anteparo. (a) feixe de luz sem filtragem, (b) parte do feixe passando pelo filtro, (c) feixe de luz passando totalmente pelo filtro.

informações e se divirta com seus amigos, alunos e familiares refazendo os experimentos aqui propostos e os que surjam com a criatividade de cada um. Sugestões e propostas são sempre bem-vindas e podem ser enviadas aos autores para o endereço eletrônico divulgado na revista.

Divirta-se!

#### Nota

<sup>1</sup>De acordo com a teoria de evolução das espécies, as limitações de nossos sentidos se devem à interação de nossos antepassados com os elementos existentes na

natureza em suas épocas. Por exemplo, o espectro óptico de resposta visual do olho humano (luz visível) encontra-se na faixa em que a absorção de radiação pela água é mínima. Isso favoreceria a sobrevivência de espécies subaquáticas, uma das formas da evolução da vida.

### Quadro 1 - Guia para retirada do filtro de infravermelho de uma webcam [8,12]

Retirar o filtro de infravermelho de uma webcam é bem simples, mas requer alguns cuidados para não prejudicar o sensor CCD nem o alinhamento das lentes. O primeiro passo é abrir a webcam, isolando a placa do circuito elétrico impresso que contém o CCD e as lentes (Fig. 10a). Feito isso, as lentes ópticas podem ser removidas girando-as da mesma forma que se ajusta o foco da câmera (Fig. 10b). Atenção, o sensor CCD ficará exposto! Qualquer sujeira que grudar ou objeto que bater no sensor prejudicará a imagem final. Cubra o sensor e mantenha-o assim até o momento da remontagem.

Agora, com muito cuidado, as lentes podem ser retiradas do conjunto lentes/suporte. Como fazer isso dependerá da webcam utilizada. Em algumas das marcas testadas basta desrosquear o sistema de lentes, já em outras este vem colado ao suporte e a desmontagem requer a habilidade de cortar ou serrar o suporte de maneira que seja possível remontá-lo novamente. Este passo requer muita cautela, pois as lentes, o filtro de infravermelho e os espaçadores podem se soltar no momento em que se desmonta o conjunto. Ao abri-lo (Fig. 10c), memorize a posição e a ordem de cada lente e espaçador para fazer a remontagem. Se apenas uma lente for colocada no sentido errado, a webcam não formará uma imagem nítida. Para finalizar, separe o filtro de infravermelho e remonte o conjunto lembrando a ordem em que as lentes e suportes foram retirados (Fig. 10d).

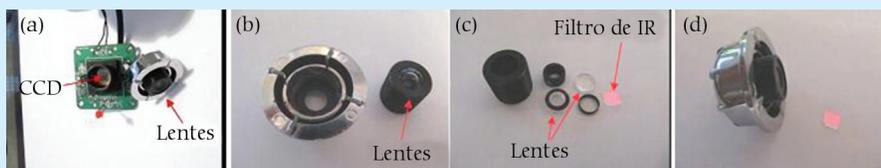


Figura 10 - Sequência de retirada de filtro infravermelho: (a) desmontagem da webcam, (b) remoção do sistema de lentes, (c) separação do filtro de IR e (d) remontagem do sistema de lentes [8].

#### Referências

- [1] Vídeo de divulgação das tecnologias e aplicações em infravermelho: [http://www.youtube.com/watch?v=JFw\\_hktTcf4](http://www.youtube.com/watch?v=JFw_hktTcf4).
- [2] D.N. Micha, *Fabricação de Fotodetectores de Radiação Infravermelha Baseados em Poços Quânticos para Detecção de Gases*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [3] website da empresa Cartronic: <http://www.cartronic.com.br/produtos/cameras-traseiras-e-visao-noturna/80-night-vision>.
- [4] W. Herschel, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **90**, 284 (1800).
- [5] website de divulgação da agência especial Americana (NASA): <http://www.nasa.gov>.
- [6] M.A. Green and M.J. Keevers, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **3**, 189 (1995).
- [7] S.M. Rezende, *Materiais e Dispositivos Eletrônicos* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2004), 2ª ed 548 p.
- [8] D.N. Micha, G.M. Penello, R.M.S. Kawabata e T. Camarotti, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 1501 (2011).
- [9] N.A. Gross, M. Hersek and A. Bansil, *American Journal of Physics* **73**, 986 (2005).
- [10] K.-P.Mollmann and M. Vollmer, *European Journal of Physics* **28**, S37 (2007).
- [11] Z. Bochnicek, *Physics Education* **43**, 51 (2008).
- [12] website de divulgação: <http://www.hoagieshouse.com/IR/>.

#### Prêmio Jabuti 2011 em Ciências Exatas vai para livro de física

*Teoria Quântica - Estudos Históricos e Implicações Culturais*, organizado por Olival Freire Jr., Osvaldo Pessoa Jr. e Joan Lisa Brumberg, Editora Livraria da Física, São Paulo, 2010, 456 p.

O livro *Teoria Quântica: Estudos Históricos e Implicações Culturais* conquistou prêmio Jabuti de 2011 na categoria Ciências Exatas. Trata-se de uma coletânea de artigos de diversos pesquisadores brasileiros e estrangeiros sobre o impacto da mecânica quântica na física e na sociedade de um modo geral. Alguns artigos versam sobre os primórdios da teoria, enquanto outros se ocupam do fenômeno mais recente da febre "quântica", um termo muitas vezes usado e abusado em diferentes contextos. O livro surgiu de conferência que reuniu diversos pesquisadores do Brasil, Itália, Alemanha e EUA e foi realizado pela Universidade Estadual da Paraíba, em Campina Grande, no ano de 2009. Os organizadores do livro são os profs. Joan Bromberg, Osvaldo Pessoa Jr. e Olival Freire Jr., este último co-editor para a área de história da física e ciências afins da Revista Brasileira de Ensino de Física.

