
ENSINANDO FÍSICA MODERNA NO SEGUNDO GRAU: EFEITO FOTOELÉTRICO, LASER E EMISSÃO DE CORPO NEGRO

Eduardo de Campos Valadares
Departamento de Física – UFMG
Alysson Magalhães Moreira
Colégio Estadual Maestro Villa Lobos
Belo Horizonte – MG

Resumo

São apresentadas sugestões, conceituais e práticas, de como introduzir no segundo grau tópicos de Física Moderna relacionados com o cotidiano dos alunos. É dada uma ênfase especial a experiências de baixo custo e que permitem uma vivência direta de alguns dos princípios subjacentes à tecnologia atual.

I. Introdução

Em nosso cotidiano deparamos cada vez mais com novos aparelhos eletrônicos (por exemplo, o onipresente computador) e opto- eletrônicos (CDs, displays de cristal líquido , leitoras óticas, xerox, impressora laser, etc.), dispositivos automáticos (portas e torneiras automáticas), sistema de controle (portão eletrônico, controle remoto de televisão e videocassete), novos usos do laser em medicina (em operações para eliminar defeitos da visão, tatuagens, pedras nos rins e no tratamento de queimados, entre outros) e nas telecomunicações (fibras óticas), além de aplicações em várias áreas industriais. Tudo isso e muito mais está presente em casa, nas lojas, nos hospitais, supermercados, carros, aeroportos e por que não, também nas próprias escolas. Jornais, rádios e a TV estão constantemente anunciando novos avanços tecnológicos que logo estarão sendo incorporados ao nosso dia-a-dia.

É imprescindível que o estudante do segundo grau conheça os fundamentos da tecnologia atual, já que ela atua diretamente em sua vida e certamente definirá o seu futuro profissional. Daí a importância de se introduzir conceitos básicos de Física Moderna e, em especial, de se fazer uma ponte entre a física da sala de aula e a física do cotidiano. Felizmente, hoje em dia é possível se adquirir por preços bem acessíveis uma

caneta-laser e vários outros artefatos tecnológicos que permitem introduzir na sala de aula novos enfoques. Além disso, é possível se construir uma série de modelos e protótipos de dispositivos e equipamentos que ilustram os princípios da Física Moderna e suas aplicações práticas. Com isso o estudante passa a ter uma motivação a mais, já que ele passa a ver o mundo com outros olhos.

É necessário resgatar o interesse dos alunos pela Física. Cada um de nós que está ligado de uma forma ou de outra ao ensino de Física sabe que o seu estudo permite uma compreensão básica da natureza, além de desenvolver nos estudantes uma série de habilidades que podem dar vazão à sua criatividade, proporcionando prazer, alegria e desafios. Sem isso, é possível tornar a Física uma disciplina interessante e atraente.

Para ilustrar nosso enfoque, consideramos três tópicos, a saber, o efeito fotoelétrico, o laser e a emissão do corpo negro, enfatizando algumas de suas aplicações através de experiências simples e acessíveis a escolas com modestos financeiros.

II. O Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é observado, por exemplo, quando uma superfície metálica ou semicondutora é iluminada com luz numa certa faixa de frequências. Neste caso, elétrons ligados aos átomos são promovidos a elétrons livres, capazes de conduzir corrente elétrica. As várias faixas do espectro eletromagnético estão indicados na Fig. 1 em escalas de frequência (f) e do comprimento de onda $\lambda = c/f$, onde c é a velocidade da luz no vácuo, que vale aproximadamente 300.000 km/s.

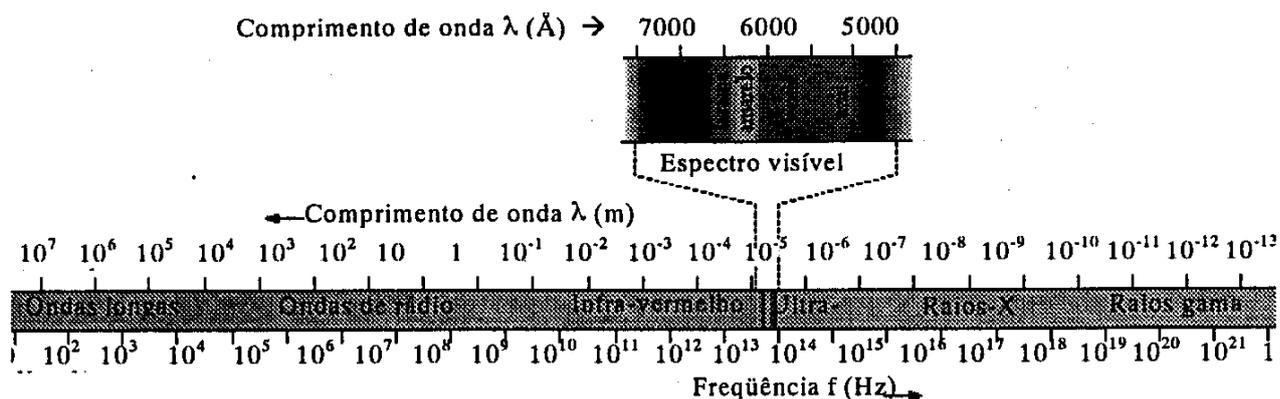


Fig. 1- Espectro eletromagnético em termos do comprimento de onda λ e da frequência f . O Ângstrom (\AA) está para o metro (m) assim como uma pulga está para a Terra.

Radiação com frequência abaixo de um certo valor mínimo não promove elétrons livre, não importa a intensidade da luz. Essa intensidade corresponde à potência emitida pela fonte luminosa. A luz, além de apresentar um comportamento ondulatório, pode ser pensada como uma forma de energia transmitida por partículas denominadas fótons. A energia E de cada fóton que constitui um feixe de luz é dada pela relação $E = hf$ ou $E = hc/\lambda$, onde h é a constante de Planck, associada aos fenômenos atômicos. Quanto mais intenso for um feixe de luz, maior é o número de fótons nele presente. Quando o feixe incide sobre a superfície, cada elétron preso tem uma certa probabilidade de interagir com um fóton. Se a energia hf do fóton for maior que a energia de ligação do elétron, denominada função trabalho, este pode ser libertado absorvendo toda a energia do fóton incidente. O valor de função trabalho depende do material da superfície. Assim, para cada material, o efeito fotoelétrico ocorrerá apenas a partir de um valor mínimo da frequência f . De nada adiantará aumentar a intensidade do feixe de luz se a frequência do fóton for menor do que este valor mínimo.

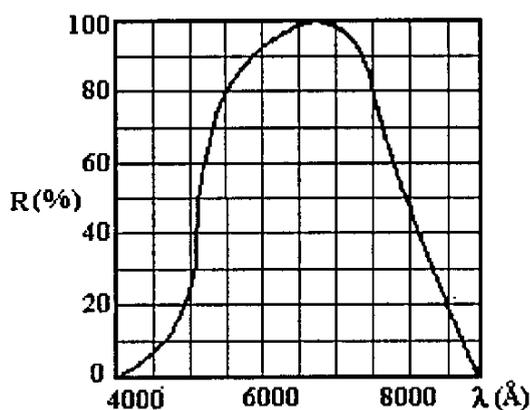


Fig. 2: Sensibilidade de um LDR para vários comprimentos de onda da luz incidente (λ).

Na Fig. 2 é mostrada a sensibilidade da resistência elétrica (R) de um dispositivo LDR. (resistência dependente da luz) para diferentes valores do comprimento de onda λ da luz incidente. O funcionamento deste dispositivo é baseado no efeito fotoelétrico. Ao ser iluminado, por exemplo quando exposto ao sol, o dispositivo passa a ter uma resistência elétrica menor, uma vez que ele passa a dispor de elétrons livres devido à ação da luz incidente, conforme ilustrado na figura a seguir. A resistência do LDR aumenta enormemente na ausência de luz, por exemplo à noite, uma vez que faltam elétrons livres. Note que sensibilidade máxima da resistência do LDR se encontra na faixa da luz visível (4000 a 7000 Å). O material base do LDR é o sulfeto de

cádmio (CdS) que é sensível à luz na faixa do visível. Para outras aplicações (por exemplo na faixa do infravermelho, como no caso do controle remoto de televisão) é necessário utilizar outros materiais (por exemplo o arseneto de gálio).

Uma aplicação: princípio de funcionamento do sistema de iluminação pública.

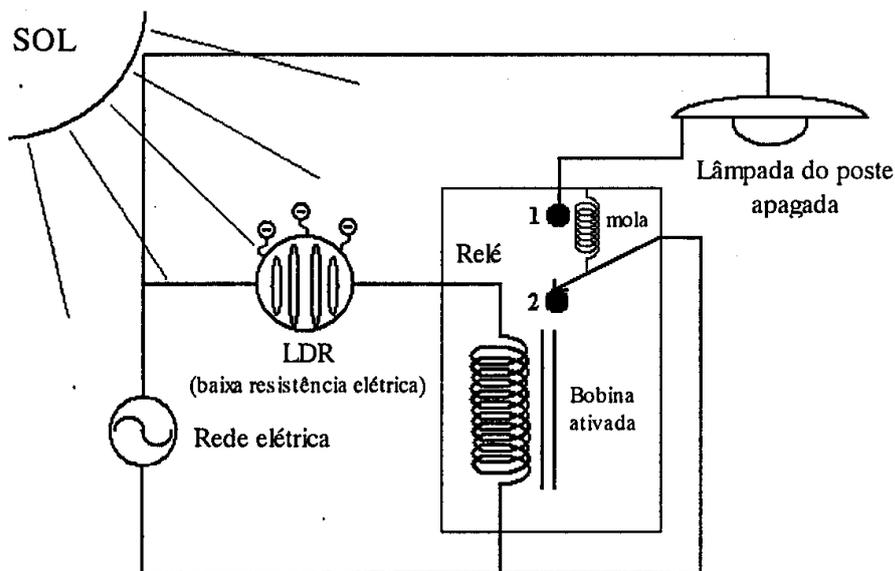


Fig. 3a: Durante o dia a luz solar promove no LDR elétrons ligados a elétrons livres, conforme indicado acima. A resistência elétrica do LDR se torna mais baixa e a corrente elétrica atravessa a bobina, gerando um campo magnético, como se ela fosse um ímã. A chave do relé é então atraída para a posição 2, impedindo que a corrente elétrica passe pelo filamento da lâmpada.

Outras aplicações do efeito fotoelétrico: controle automático de portas de elevadores e de esteiras de supermercados. Neste caso um feixe de luz, ao ser interrompido, aciona um sistema automático que abre a porta do elevador ou movimenta a esteira.

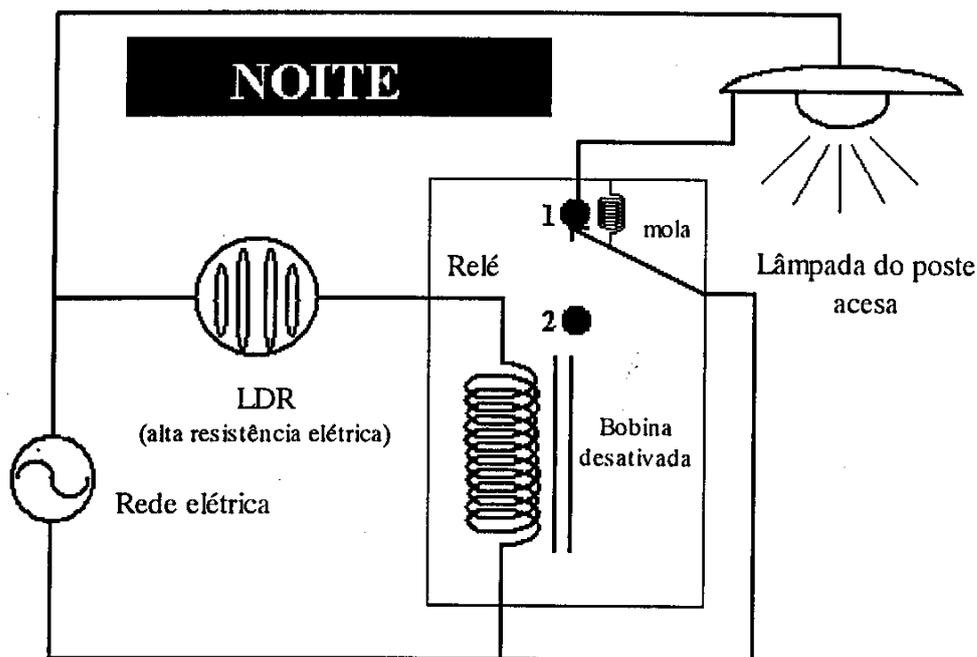


Fig. 3b: À noite, a resistência elétrica do LDR é alta pois a luz solar não está presente, impedindo que a corrente elétrica atravessasse a bobina, que deixa de atuar como ímã. A mola obriga então a chave do relé a retornar para a posição 1, acionando a lâmpada, que se apagará automaticamente no dia seguinte, uma vez que o circuito volta à situação mostrada na Fig. 3 a.

III. Laser: Stimulated Emission of Radiation (amplificação da luz pela emissão estimulada de radiação)

O laser é basicamente um amplificador ótico. Ele amplifica luz de modo semelhante ao amplificador acústico. No caso de um violão, por exemplo, ocorre a amplificação do som produzido pelas cordas através da caixa de ressonância do instrumento.

Como funciona o laser?

Existem vários tipos de laser: os lasers a gás (Por exemplo o laser de hélio-neônio e o de CO₂, de alta potência), lasers de líquido, como os de corantes, e os lasers de estados sólido (caneta-laser, laser dos CDs, etc.). Para entender a idéia básica pense no violão. Os dedos, ao tocar as cordas, produzem som (as cordas, ao vibrarem, varrem o ar periodicamente, gerando zonas de compressão e descompressão). A caixa acústica do violão amplifica o som produzido. A abertura na caixa do violão permite que o som

amplificado seja ouvido. Considere a seguinte experiência: toque um “violão” com a abertura da caixa acústica tampada com papelão e compare o som produzido nestas condições com o som produzido em condições normais. Se você não dispõe de um violão, tente a seguinte experiência. Estique uma gominha com as duas mãos e a faça vibrar com um dos dedos. Pegue agora uma caixa de plástico ou de papelão (por exemplo de sapatos), ou ainda uma panela, sem tampa. Estique a gominha e prenda as suas extremidades no topo de duas paredes postas da caixa. Compare os sons produzidos pela gominha presa a suas mãos com os sons produzidos pela mesma gominha em contato com a caixa. Estas experiências ilustram de forma clara o papel da caixa acústica do violão.

No caso do laser a gás, existe um meio ativo que gera luz (por exemplo átomos de hélio e neônio). Uma lâmpada *flash* ou uma corrente elétrica cede energia aos átomos que constituem o gás (excita-os). Os elétrons dos átomos passam a ocupar estados de mais alta energia, característicos de cada átomo do gás. Ao retornarem aos seus estados originais de mais baixa energia há emissão de fótons (luz), conforme ilustrado na Fig. 4.

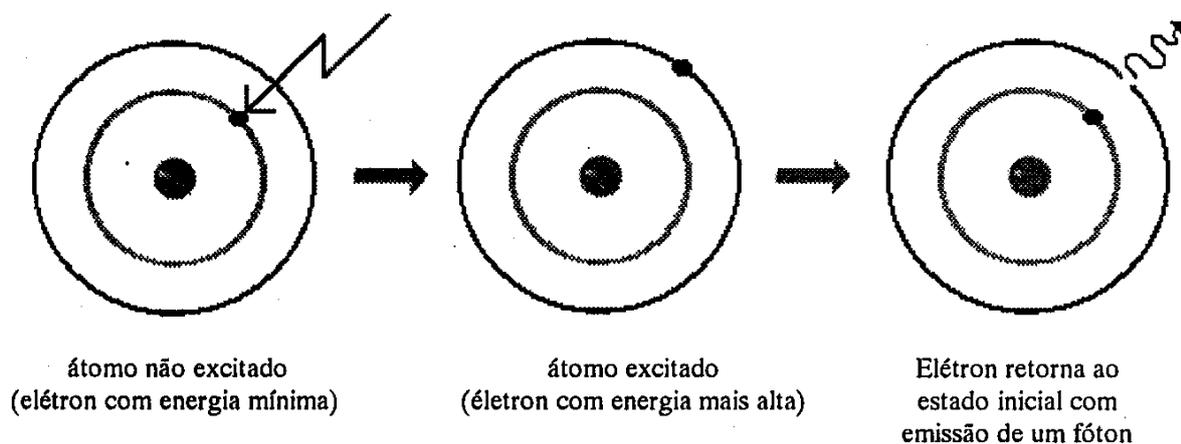


Fig. 4: Emissão de fótons por átomos excitados

Existem dois modos pelos quais um átomo excitado pode voltar ao seu estado original de mais baixa energia e emitir um fóton. A emissão pode ser (a) *espontânea* ou (b) *estimulada*, conforme ilustrado na Fig. 5.

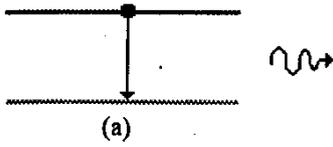


Fig.5a: emissão espontânea

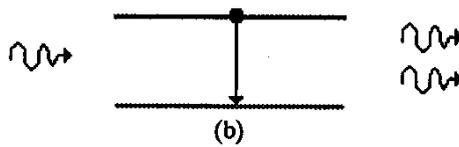


Fig.5b: emissão estimulada: “entra” um fóton e “saem” dois idênticos.

Na emissão estimulada, um fóton incidente estimula o átomo excitado a emitir um fóton idêntico ao primeiro. Os fótons assim emitidos induzem os demais átomos excitados a emitirem novos fótons todos idênticos, gerando um processo em cascata (“bola de neve”). Este processo produz luz monocromática e coerente, ou seja, todos os fótons iguais. Para visualizar o que ocorre no laser, que emite luz monocromática e coerente através da emissão estimulada, apresentamos a seguir um modelo mecânico de uma equipe de esportistas num barco a remo (veja Fig. 6).

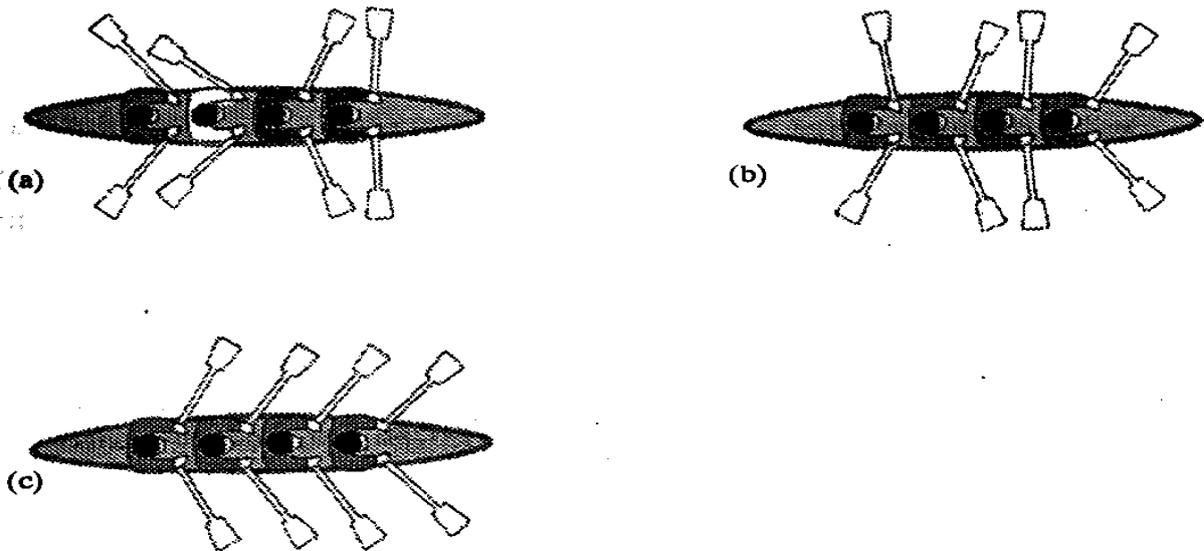


Fig. 6a: Os quatro remadores remam com freqüências diferentes e seus movimentos não estão sincronizados (luz com componentes de freqüências distintas e incoerentes, como em uma lâmpada de filamento). Fig. 6b: Os quatro remadores remam com a mesma freqüência porém começaram a remar em instantes diferentes de modo que seus movimentos também não estão sincronizados (luz monocromática e incoerente, por exemplo, lâmpada com um filtro). Fig. 6c: Os quatro remadores remam com a mesma freqüência e seus movimentos estão sincronizados (luz monocromática e coerente do laser).

A luz do laser difere da luz de uma lâmpada de filamento, a qual apresenta componentes de várias frequências, como pode ser verificado, por exemplo, utilizando-se um prisma (veja Fig. 7). Na lâmpada, bilhões e bilhões de átomos do filamento aquecido são excitados por efeito Joule (aquecimento do filamento com a passagem de corrente, como em um ferro elétrico de passar roupa). Entretanto, a emissão de fótons é desordenada, já que cada átomo excitado emite por conta própria fótons diferentes, ao contrário da luz do laser, onde o processo de emissão é desencadeado por fótons já emitidos, de modo que todos os fótons acabam sendo idênticos (luz coerente). Esses dois tipos de luz (incoerente e coerente) podem ser também visualizados através de uma outra analogia. Considere uma multidão andando aleatoriamente na rua e um desfile militar, onde as fileiras de soldados marcham em sincronia. A multidão representa, nesta analogia, a luz incoerente da lâmpada, e a marcha militar, onde os soldados, a princípio, marcham todos de forma idêntica, corresponde à luz coerente do laser.

A luz gerada no laser, para ser amplificada, necessita de uma cavidade ótica, do mesmo modo que o violão precisa de uma caixa acústica para amplificar o som. Dois espelhos paralelos dão conta do recado. A luz “bate” num espelho e reflete de volta no outro espelho e assim por diante (você pode verificar esse efeito colocando dois espelhos planos um em frente ao outro: haverá a formação de um número infinito de imagens se você colocar um objeto entre eles). Neste vai-e-vem a intensidade da luz é amplificada, de acordo com a descrição acima. Na prática a cavidade ótica do laser é formada por um espelho côncavo (veja o lado côncavo de uma colher!) e um espelho plano.

Esta cavidade apresenta menores perdas do que uma cavidade formada por dois espelhos planos. Um dos espelhos do laser é semitransparente (deixa passar um pouco da luz amplificada) do mesmo modo que a abertura na caixa do violão nos permite ouvir o som amplificado. Você pode ilustrar facilmente uma característica fundamental das cavidades óticas utilizando uma corda ou gominha esticada com as duas extremidades fixas (as pontas fixas correspondem aos dois espelhos do laser), que é excitada por um vibrador mecânico (ou sua mão) de frequência variável. As ondas transversais produzidas na corda (vibrações perpendiculares à direção de propagação da onda) apresentam amplitudes perceptíveis apenas para certas frequências múltiplas de um valor fundamental. Uma cavidade ótica também só amplifica luz com frequências bem definidas, que dependem das dimensões da cavidade. Uma descrição esquemática de um laser é mostrada na Fig. 8:

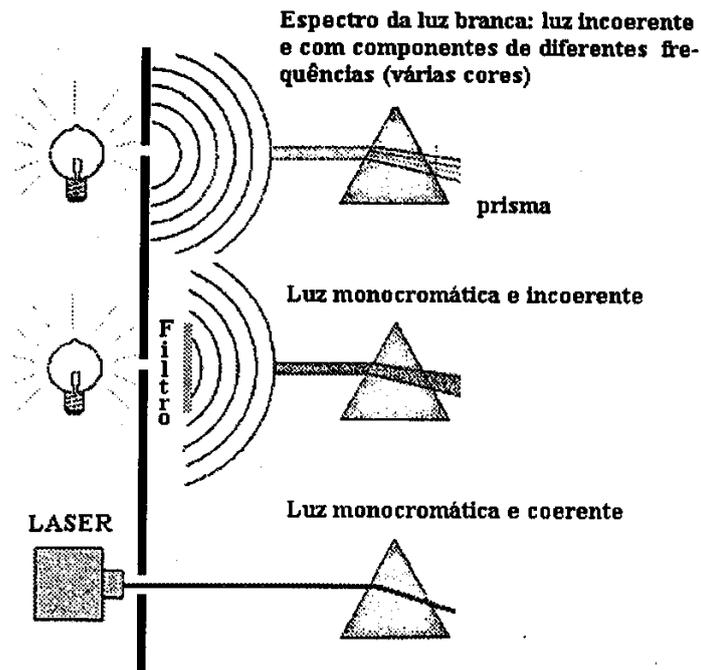


Fig. 7 – Comparação entre a luz de uma lâmpada de filamento e a do laser.

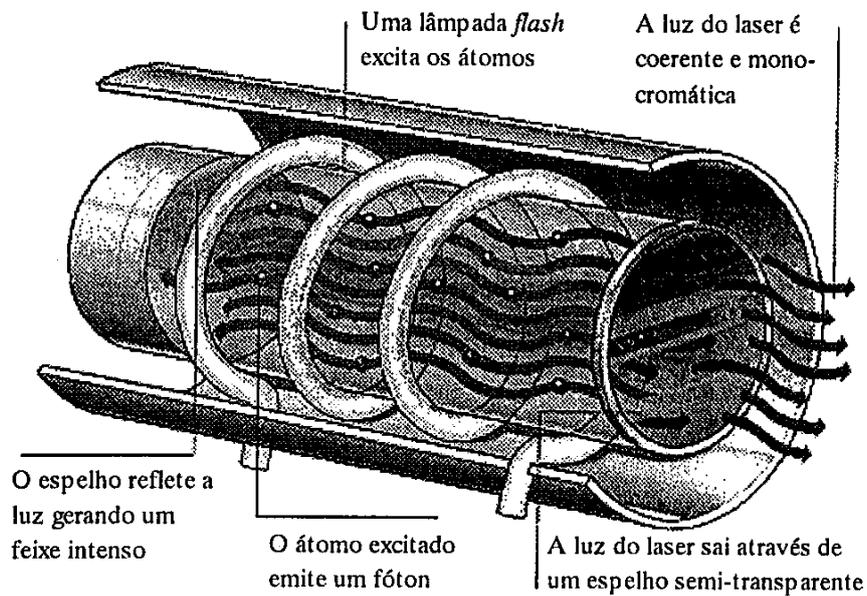


Fig. 8: Esquema simplificado de um laser a gás.

No caso do laser de estado sólido (por exemplo, semicondutor), você tem basicamente a mesma coisa: elétrons injetados no dispositivo decaem para estados de mais baixa energia emitindo fótons com praticamente a mesma frequência, característica do semicondutor. Deste modo, há a conversão de corrente elétrica em luz. Um material cristalino reúne um número enorme de átomos ordenados espacialmente. Cada átomo do cristal fica afetado pela presença dos demais átomos que constituem o material. Em virtude desta interação entre átomos, os níveis de energia característicos de cada átomo individual dão origem a faixas (bandas) de energia que dizem respeito ao material como um todo. Do mesmo modo que um átomo isolado, existe uma região proibida para os elétrons entre dois níveis próximos, também num sólido cristalino existe uma região proibida entre duas bandas de energia vizinhas. A separação em energia (E) entre as duas bandas é que define a frequência (f) do fóton emitido (lembrese que $E = hf$ ou $f = E/h$).

As aplicações do laser decorrem, entre outras, das seguintes propriedades básicas:

(1) A velocidade da luz no vácuo é a maior possível (para uma demonstração simples basta comparar a velocidade da luz com a velocidade do som no ar: primeiro vemos no céu um clarão e só instantes depois ouvimos o barulho do trovão).

(2) Num meio homogêneo, a luz se propaga em linha reta, podendo portanto substituir o teodolito (encha uma caixa de plástico transparente com água, adicione umas poucas gotas de leite ou detergente e agite. Incida o laser e uma linha luminosa ficará visível).

(3) A luz, por ter um caráter de onda, sofre refração (o material da experiência anterior pode ser usado para demonstrar este efeito: incida o laser obliquamente à superfície da água) e difração. Este último efeito está associado ao espalhamento de luz *coerente* por obstáculos com dimensões da ordem do comprimento de onda do feixe incidente. Para demonstra-lo você pode usar uma caneta-laser e uma camisa de seda, cujos fios entrelaçados formam uma rede de obstáculos para o feixe do laser. Tampe a saída do laser com a camisa e você verá na parede uma rede de pontos regularmente espaçados (repita a mesma experiência com uma lanterna comum, cuja luz é incoerente, e veja a diferença). Você também pode observar o efeito de difração ao incidir o feixe de uma caneta-laser diretamente em uma parede. À medida que você se afasta da parede, o diâmetro do ponto luminoso aumenta, pois a luz é espalhada para os lados na saída do próprio laser, gerando uma certa divergência do feixe. Se o efeito de difração não ocorresse, o diâmetro do ponto luminoso não dependeria da distância do laser à mesma e seria idêntico ao diâmetro do orifício por onde sai a luz do laser. Esta

situação pode ser comparada à saída de torcedores de um estádio lotado por um único portão estreito. Ao passar pelo portão, a multidão espalha para os lados.

(4) A luz do laser pode ser focalizada em uma área muito pequena com uma lente convergente. Isto permite utilizar o laser para aquecer ou cortar regiões muito localizadas.

(5) A luz pode transportar informações (por exemplo, apagando-se e acendendo-se o laser numa certa ordem), bem como ler informações, como no caso do código de barras (veja descrição abaixo).

(6) Feixes de luz podem ser facilmente direcionados através de espelhos (reflexão) e conduzidos por fibras óticas (uma demonstração simples é sugerida abaixo).

(7) Os lasers pulsados podem gerar pulsos intensos de luz de curta duração, nos quais a energia é concentrada, podendo ser usado como bisturi e como ferramenta de corte de grande precisão.

(8) A luz pode também controlar correntes elétricas (efeito fotoelétrico), o que permite, por exemplo, converter sinais luminosos de um laser em som, como um CD.

Experiências que demonstram algumas aplicações práticas do laser:

1) Fibras óticas

As fibras óticas são, basicamente, “mangueiras de luz”. Elas guiam a luz de uma extremidade da fibra até a outra ponta. Isto ocorre devido a reflexões totais do feixe de luz no interior da fibra (veja Fig.9).

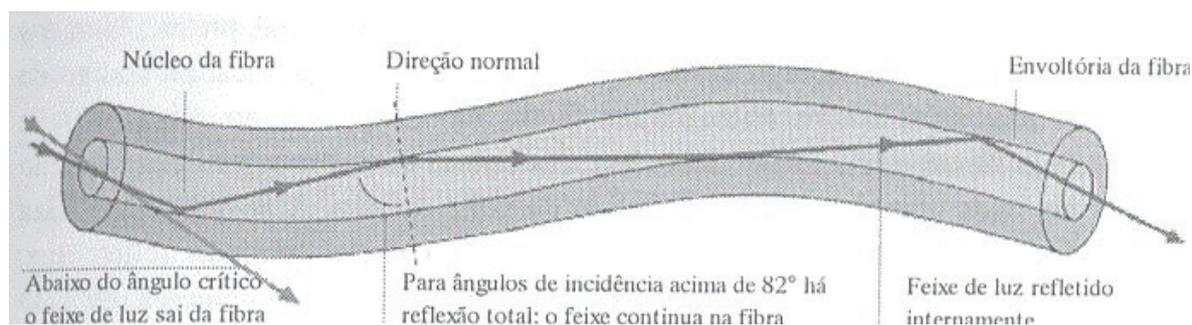


Fig. 9: Transmissão de luz através de uma fibra ótica.

Como demonstrar de um modo simples o princípio da fibra ótica:

As fibras óticas são cada vez mais utilizadas em telefonia. Em vez de eletricidade, luz, em vez de cabos de cobre, fibras óticas. E por que? Porque a luz se propaga a uma velocidade muito maior do que os elétrons nos fios de cobre. Além disso, é possível transmitir muito mais informações através de uma fibra ótica do que por via do sistema tradicional que utiliza cabos de cobre. Várias cidades do mundo já contam com um sistema telefônico baseado em fibras óticas, inclusive já contam com um sistema telefônico baseado em fibras óticas, inclusive ligando-as a diferentes cidades e continentes.

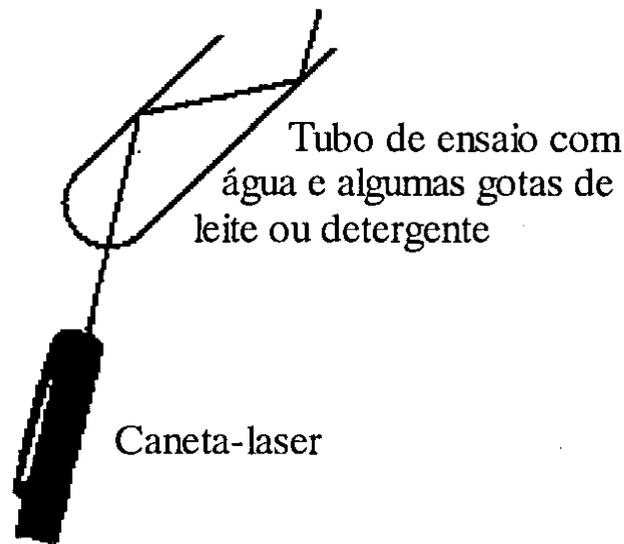


Fig. 10: Na experiência acima, pode-se usar também uma garrafa de plástico transparente em vez do tubo de ensaio. É mais conveniente incidir o laser na região próxima ao gargalo da garrafa de cabeça para baixo com a tampa fechada.

2) Leitura do código de barras

Você já deve ter notado que vários produtos vendidos nos supermercados e lojas já vêm com uma etiqueta com várias barras pretas separadas por espaço em branco (código de barras). Na Fig. 11 são mostrados um código de barras (à esquerda) e uma leitora ótica (à direita). A pessoa no caixa passa o produto em frente à leitora ou vice-versa. Na leitora encontra-se um laser que ao incidir em cada uma das faixas é refletido de volta ou não. A luz refletida (faixa branca) representa um número (zero) e a faixa escura, que não reflete luz, corresponde ao número um (1). O código binário é baseado nos números 0 e 1. O número binário lido corresponde ao número de controle do

produto. O computador se encarrega de listar o preço correspondente e agora é só pagar.

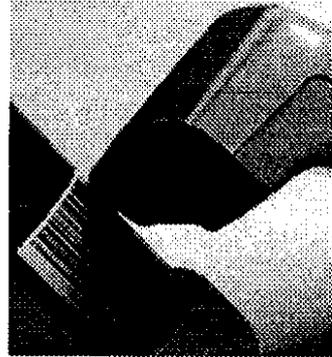
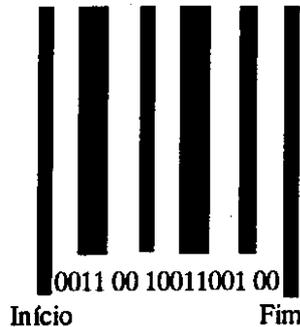


Fig. 11: Zero (0) e um (1) ocupam posições que vão de 1 (início) a 16 (fim). O número decimal correspondente ao código é facilmente obtido somando-se as potências de 2 associadas às posições ocupadas por 1. Portanto: número do código do produto = $2^3 + 2^4 + 2^7 + 2^{10} + 2^{11} + 2^{14} = 19.608$

IV. A radiação de corpo negro

Todos os objetos com temperatura finita, inclusive os nossos corpos, emitem radiação. O espectro de emissão dos objetos depende, em geral, da sua geometria e do material constituinte. Uma cavidade no interior de um tarugo de alumínio ou outro material constitui um caso muito especial. É necessário um pequeno orifício para que uma fração da radiação emitida pela cavidade saia para fora da mesma e seja detectada. O espectro de emissão da cavidade depende apenas da temperatura do corpo onde ela se encontra e é universal. Temos então um corpo negro. Por que negro? Porque este corpo apresenta o máximo de absorção e, conseqüentemente, de emissão de radiação para uma dada temperatura. Qualquer outro corpo absorve ou emite menos radiação que o corpo negro. Você pode verificar, por exemplo, que as cavidades formadas por carvões em brasa parecem mais brilhantes – uma evidência do seu caráter de “corpo negro”. Uma experiência interessante que você pode realizar para demonstrar este efeito requer apenas duas latas vazias de cerveja, tinta preta e dois termômetros. Pinte o exterior de uma das latas totalmente de preto. Encha as duas latas com água fervente e coloque um termômetro no interior de cada uma delas. Qual das duas irá resfriar mais rapidamente?

Experiência de absorção e emissão de radiação: o aquecedor solar. O experimento a seguir mostra como funciona o aquecimento de água usando energia solar (veja Fig. 12). A caixa de madeira tem uma tampa de vidro. O interior da caixa é

todo preto. Coloque um termômetro no interior da mesma e ilumine a tampa com uma lâmpada incandescente.

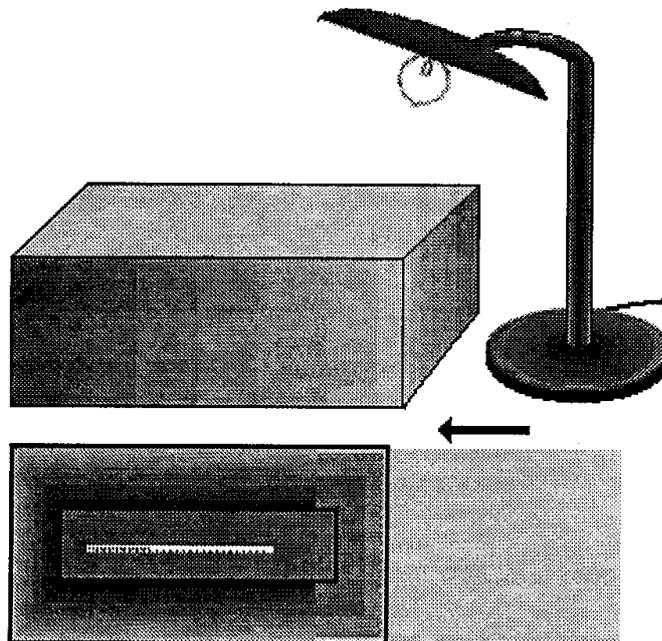


Fig. 12: Esquema de um aquecedor solar simples com vista de cima.

Os raios luminosos, após atravessarem o vidro, são absorvidos pelas paredes e pelo fundo da caixa, que por sua vez emitem radiação – a maior contribuição encontra-se na faixa do infravermelho. O vidro reflete praticamente toda a radiação infravermelha, que fica portanto “aprisionada” dentro da caixa. Com isso, a temperatura no interior da mesma aumenta e isto pode ser verificado acompanhando-se a temperatura registrada pelo termômetro. Este processo é ilustrado na Fig. 13. Se você agora passar água à temperatura ambiente através de uma serpentina de cobre colocada dentro da caixa, poderá esquentar a água já que o cobre é um material que permite uma troca eficiente de calor. Basta agora armazenar a água aquecida num reservatório térmico, semelhante a uma garrafa térmica, e está pronto o seu aquecedor solar. Este mesmo experimento demonstra porque o interior dos carros se torna um “forno” quando eles ficam expostos ao sol com as janelas fechadas e também ilustra o “efeito estufa”. Este efeito está relacionado com o aquecimento de nosso planeta devido ao aumento da emissão de CO_2 (dióxido de carbono) por veículos motorizados, fábricas e queimadas. O CO_2 faz o papel do vidro, de modo que o aumento da sua quantidade na atmosfera implica no aumento da temperatura da Terra (caixa de madeira) devido à incidência de luz solar (lâmpada incandescente).

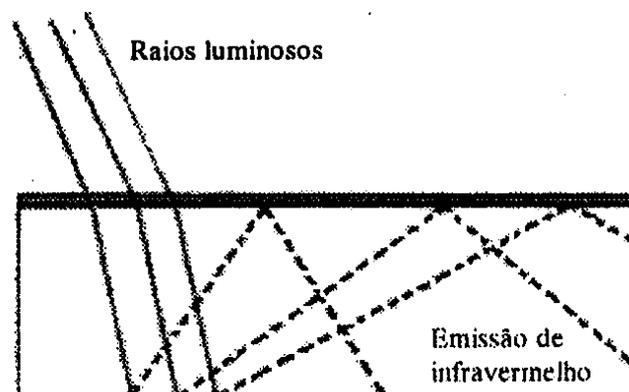


Fig. 13: Absorção da luz incidente (linhas contínuas) pela área preta da caixa com emissão de infravermelho (linhas tracejadas) e sua reflexão na tampa de vidro.

V. Agradecimentos

Os autores agradecem à Professora Beatriz Alvarenga pela leitura crítica do manuscrito e aos vários alunos dos Cursos Noturnos de Licenciatura da UFMG pela inestimável colaboração e inspiração, bem como ao Prof. Sebastião J.N. de Pádua pelas inúmeras sugestões. Este trabalho é parcialmente financiado com recursos do “Programa de Apoio à Formação de Professores e à Docência em Ciências e Matemáticas nos Ensinos médio e Fundamental – SPEC/PADCT”.

VI. Referências Bibliográficas

ARDLEY, N., How Things Work, Dorling Kindersley limited, London, 1995.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. e WALKER, J., Fundamentos de Física, vol. 4 (Ótica e Física Moderna), LTC Editora, 4ª. Edição, 1995

TIPLER, P., Física, vol.4, Editora Guanabara Koogan S.A., 3ª. Edição, 1994.