

Espectros e modelos atômicos

Quando Kirchhoff e Bunsen, ambos professores em Heisenberg, deduziram a partir de suas experiências em 1859 que cada elemento emite em determinadas condições um espectro característico exclusivamente desse elemento, descobriu-se não só uma propriedade fundamental da matéria, mas também um poderoso método de análise. Abriu-se então um novo campo de investigação altamente promissor que permitiu, dentre outras coisas, a des-

coberta de um novo elemento até então desconhecido na Terra: o hélio. A descoberta deu-se a partir da análise espectral do Sol, em 1868. É importante notar que praticamente tudo que se sabe sobre a composição química dos astros se deve aos avanços da espectroscopia. Mas as contribuições da espectroscopia são inúmeras. A partir de meados do século XIX, os progressos nas técnicas de espectrometria e a sistematização das medidas permitiram catalogar os diversos comprimentos de onda dos elementos até então conhecidos, bem como a descoberta de novos elementos.

Métodos de espectrometria são hoje utilizados na indústria e em laboratórios de análises clínicas para determinar a composição de uma substância, já que a radiação luminosa emitida é característica da substância que a emite. Em astrofísica, além de determinar a composição e tempera-

tura de estrelas, permite estudar o movimento dos corpos celestes, por Efeito Doppler. Mas foi na física do final do mesmo século e início do século XX, com o estudo do espectro de emissão de um corpo negro, que a espectrometria impulsionou o surgimento do que chamamos de física moderna. Corpos negros emitem, a uma dada temperatura, espectros

Tudo que se sabe sobre a composição química dos astros se deve aos avanços da espectroscopia, cujas contribuições à Ciência são inúmeras, principalmente na indústria e em análises clínicas

idênticos, independente de sua composição. Essa característica intrigante o tornou alvo de grande interesse por parte dos físicos teóricos, cujo trabalho consistia em deduzir uma equa-

ção que permitisse calcular a energia emitida pelo corpo negro correspondente a cada um dos comprimentos de onda do espectro da luz por ele emitida. Leis empíricas surgiram do estudo experimental detalhado de corpos negros a temperaturas diferentes. A Lei de Wien mostra uma proporcionalidade entre a frequência na qual a radiação emitida tem intensidade máxima e a temperatura do corpo, isto é:

$$v_{\max} = \frac{1}{b} \cdot cT$$

($c = 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo e $b = 2,898 \times 10^{-3}$ m.K a constante de Wien).

A lei de Stefan - Boltzman explica o fato de termos um aumento considerável para a intensidade total da radiação emitida pelo corpo negro com o aumento de temperatura, pois a energia total irradiada pelo corpo

.....
Marisa Almeida Cavalcante

e-mail: marisac@puccsp.br
e

Cristiane Rodrigues Caetano Tavoraro

e-mail: cris@puccsp.br
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo

.....
Rafael Haag

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
e-mail: haag@if.ufrgs.br

.....

A introdução de física moderna no Ensino Médio é hoje consenso entre os professores de Física, já que o seu entendimento é visto como uma necessidade para a compreensão de fenômenos ligados a situações vividas pelos estudantes, sejam de origem natural ou tecnológica. Muitos esforços têm sido alocados com o objetivo de se desenvolver recursos pedagógicos que permitam aos professores abordar tópicos da Física desenvolvida no século XX [1-17]. Neste trabalho apresentaremos um conjunto de experimentos que permitirá ao professor discutir o conceito de *quantum* de energia. Tais experimentos permitem dentre outras observações determinar através de dois métodos distintos a constante de Planck. Formas discretas de emissão e absorção de radiação e que são manifestações imediatas do *quantum* de energia serão apresentadas utilizando material de baixo custo e de fácil reprodutibilidade. Por outro lado, o instrumental construído nos permite também estudar a emissão e absorção característica de LEDs (*light emission diode*), permitindo a abordagem de conceitos importantes como a ressonância e o princípio de funcionamento de dispositivos semicondutores, fruto das descobertas da física moderna e contemporânea.

negro é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta.

Baseando-se nesses resultados, Max Planck, em 1900, deu um salto qualitativo muito importante para o desenvolvimento da física moderna ao introduzir a hipótese dos quanta na equação do cálculo da energia emitida pelo corpo negro. Segundo a hipótese, a radiação eletromagnética apresenta uma descontinuidade: nasce o fóton de luz de energia $E = h\nu$ e Einstein, em 1905, utiliza esse mesmo conceito para explicar o Efeito Fotoelétrico!

Concomitante a essas descobertas, a incrível regularidade dos espectros emitidos por gases permitiu que se obtivessem fórmulas empíricas para calcular as frequências emitidas por um dado elemento.

O mesmo conceito de descontinuidade da radiação eletromagnética, aliado à regularidade dos espectros emitidos por gases, levou Bohr, em 1913, a utilizar as fórmulas empíricas dos espectros atômicos na formulação dos seus famosos postulados, dando origem ao primeiro modelo atômico consistente: o modelo para o átomo de hidrogênio.

Vemos, portanto, o papel fundamental desempenhado pela espectrometria não somente como técnica de medida utilizada até hoje mas principalmente como protagonista do nascimento de conceitos e modelos que revolucionaram a Física no século XX!

Na seqüência, apresentaremos

diferentes propostas experimentais que permitem estudar espectros de emissão e absorção e ainda uma proposta de baixo custo para a observação de espectro de absorção.

Espectros de emissão

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos [10-18] utilizando CDs como redes de difração envolvendo desde a construção de espectroscópios manuais [13-17] até a medida de comprimentos de onda através de anéis projetados [11]. Selecionamos três técnicas distintas de análise e se manuseadas adequadamente permitirão efetuar medidas com elevado grau de precisão.

Espectro de emissão por projeção: Feixe refletido

Este método fornece anéis de interferência projetados em uma tela. Os comprimentos de onda da radiação podem ser obtidos a partir da medida do ângulo de desvio de cada anel. Esta técnica de medida é descrita em detalhes por Cavalcante e Benedetto [11]. Uma montagem que permite a visualização destes anéis de interferência pode ser vista na Figura 1.

Valores dos comprimentos de onda podem ser estimados se construirmos uma curva de calibração deste espectroscópio. Para isso basta utilizar como fonte luminosa uma lâmpada eletrônica fluorescente de Hg compacta (aconselha-se no mínimo 24 W),

já que se pode observar nitidamente suas linhas características laranja, verde e violeta, cujos comprimentos de onda são 578 nm, 546 nm e 436 nm, respectivamente.

Em seguida retira-se a fonte calibradora e dispõe-se na mesma posição uma fonte de luz cujo comprimento de onda se deseja medir. O gráfico da Figura 2 mostra a curva de calibração bem como os pontos obtidos para os comprimentos de onda de dois LEDs comerciais, vermelho e verde. Os resultados, 600 nm para o vermelho e 550 nm para o verde, estão próximos dos valores fornecidos pelo fabricante.

Espectro de emissão por projeção: Feixe transmitido

Para se obter a projeção do espectro por feixe transmitido usando o CD, é necessário retirar sua camada refletora de alumínio de modo a torná-lo transparente. Para isso, toma-se um CD gravável, recobre-se com fita crepe e faz-se um pequeno corte com um estilete na sua superfície, como indica a Figura 3a. Ao puxar a fita (Figura 3b), esta traz a camada refletora, deixando o CD completamente transparente.

Para a observação do espectro será necessário utilizar uma fonte colimada de luz, uma lupa, um CD transparente e régua. Inicialmente ajusta-se a posição relativa entre tela, fonte e lupa de modo a se obter uma imagem bem nítida da fenda (Figura 4).

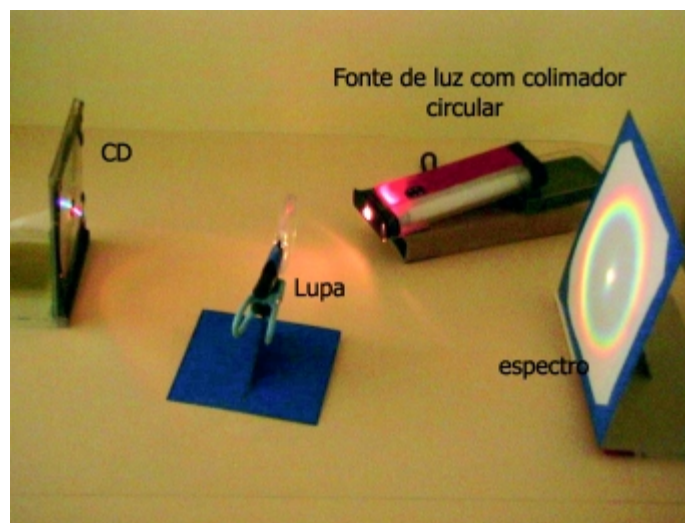


Figura 1. Montagem utilizada para a observação do espectro de emissão por reflexão no CD. Na tela, são observados os anéis de interferência.

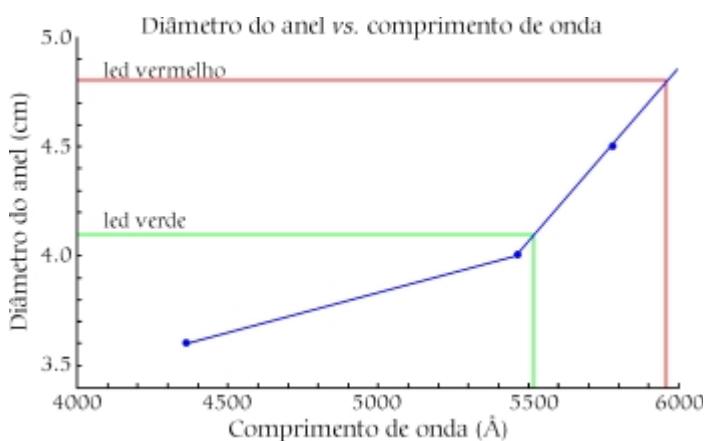


Figura 2. Curva de calibração e determinação dos comprimentos de onda de dois LEDs comerciais, vermelho e verde. Observe os valores obtidos para os comprimentos de onda, cerca de 600 nm e 500 nm, respectivamente, são bem razoáveis e estão de acordo com os valores fornecidos pelos fabricantes.

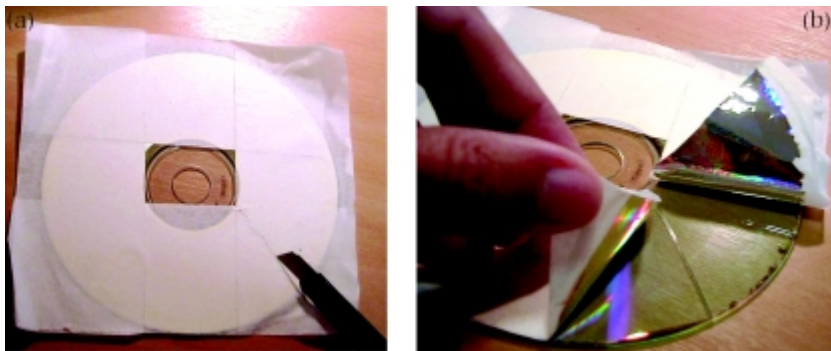


Figura 3. Procedimento para a retirada da superfície refletora de um CD.

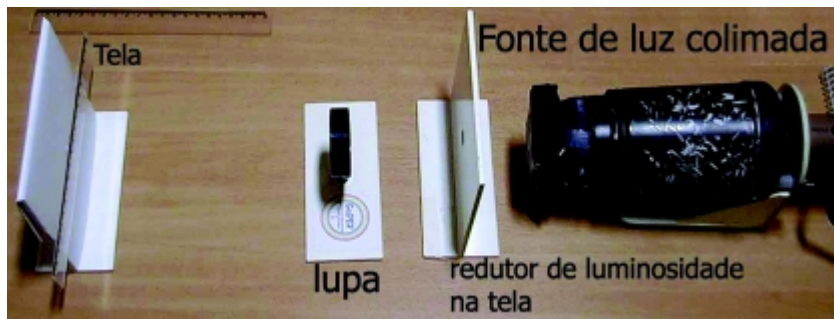


Figura 4. Montagem mostrando o ajuste inicial da imagem da fenda na tela. Algumas vezes a fonte de luz provoca uma luminosidade excessiva na tela prejudicando a visualização das linhas espectrais. Neste caso pode-se reduzir esta luminosidade interpondo uma placa com orifício entre a lupa e a tela, melhorando a visualização do espectro.

Em seguida coloca-se o CD entre a lupa e a tela até que se observe o espectro com nitidez (Figuras 5 e 6).

Para a determinação dos comprimentos de onda devemos medir o desvio de cada linha projetada em relação à fenda, conforme o esquema da Figura 7. A equação que permite calcular o comprimento de onda λ da radiação correspondente à linha escolhida é dada por:

$$N\lambda = d\text{sen}\theta, \quad (1)$$

onde N corresponde à ordem do espectro que será analisado, d é a distância entre as ranhuras do CD ($d = 1/625$ mm pois o CD contém 625 ranhuras/mm) e θ é o ângulo de desvio da linha escolhida em relação ao eixo correspondente à fenda projetada. Para determinar $\text{sen}\theta$, faz-se

$$\text{sen}(\theta) = \frac{X}{(D^2 + X^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

onde X é o desvio medido na tela de projeção e D é a distância entre o CD e a tela (Figura 7).

Para permitir uma comparação entre os resultados obtidos pelo método 1 (espectro de emissão por reflexão) e o método 2 (espectro de emissão por feixe transmitido), obtivemos informações relativas ao comprimento de onda médio emitido por um LED comercial



Figura 5. O CD disposto entre a lupa e a tela para a decomposição espectral.

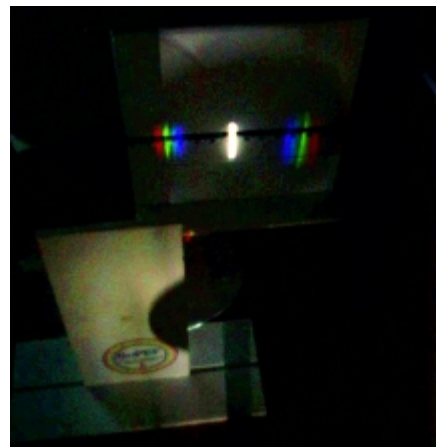


Figura 6. Espectro de 1ª ordem obtido para o Hg. As linhas que são observadas com maior nitidez são violeta, verde, azul, laranja e vermelha.

vermelho. Para 5.0 cm de distância entre o CD e a tela obtivemos um desvio X de 2,3 cm, o que conduz a um comprimento de onda médio da emissão igual a 669 nm. A Figura 8 mostra o espectro de 1ª ordem obtido. Para que se obtenha bons resultados, devemos garantir uma boa simetria para estes desvios em relação à imagem da fenda. Desvios simétricos garantem que tanto o CD quanto a tela encontram-se perpendiculares ao feixe incidente.

Espectroscópio manual

Uma opção muito interessante e bastante funcional para as escolas que não dispõem de laboratórios ou salas escuras para a observação dos espectros de projeção são os espectroscópios manuais. Detalhes sobre a construção de um espectroscópio manual podem ser encontrados em Cavalcante e Tavoraro [16]. A Figura 9 mostra uma foto de um desses espectroscópios. Trata-se de uma caixa em que em uma de suas extremidades é fixado um pe-

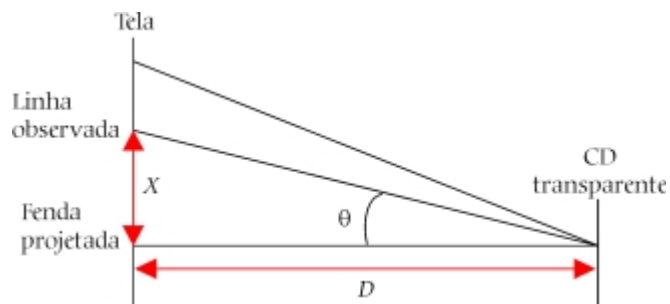


Figura 7. Esquema indica como determinar o comprimento de onda da radiação usando um CD como rede de difração.

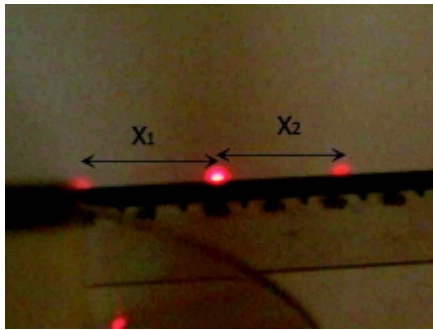


Figura 8. Espectro de 1ª ordem de um LED vermelho. Nesta montagem $X_1 = X_2$ mostrando uma perfeita simetria, condição necessária para se obter bons resultados. Essa simetria indica que tanto o CD quanto a tela encontram-se perpendiculares ao feixe incidente de luz.

daço de CD transparente e na outra, onde ocorre a incidência de luz, dispomos de uma escala graduada que servirá de tela para a projeção do espectro. A fenda que colima o feixe é ajustada pelo observador, permitindo maior facilidade de manuseio.

Como sugestão, pode-se calibrar a escala a partir da relação expressa na Eq. (1), onde a distância da rede de difração à tela (D) é característica de cada caixa (Figura 9). Como a distância entre as ranhuras de um CD é conhecida e assume o valor de $1,6 \mu\text{m}$, pode-se obter os valores de cada desvio para comprimentos previamente fixados. Para o espectroscópio da Figura 9 temos $D = 12,5 \text{ cm}$, fornecendo a Tabela 1.

A Figura 10 mostra o espectro de uma lâmpada de Hg comercial obtido com um espectroscópio manual.

De modo a permitir comparações com os demais métodos, obtivemos o espectro de um LED vermelho também a partir deste espectroscópio, indicado na Figura 11.



Figura 9. Espectroscópio manual segundo Cavalcante e Tavoraro [16].

Tabela 1. Calibração de um espectroscópio manual com $D = 12,5 \text{ cm}$.

λ (nm)	$\text{sen}\theta$	X (cm)
400,00	0,25	3,23
450,00	0,28	3,66
500,00	0,31	4,11
550,00	0,34	4,58
600,00	0,38	5,06
650,00	0,41	5,56
700,00	0,44	6,08

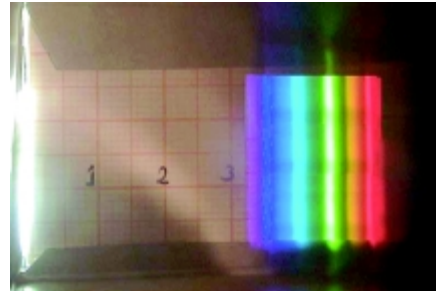


Figura 10. Espectro observado em um espectroscópio manual com $D = 12,5 \text{ cm}$.

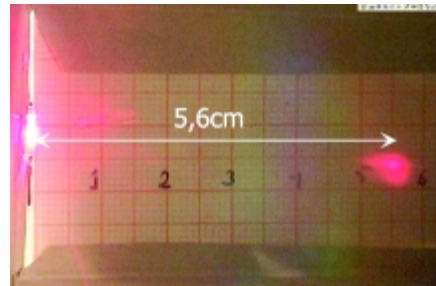


Figura 11. Espectro observado na tela de um espectroscópio manual. Pela tabela de calibração, temos um valor para o comprimento de onda médio de emissão do LED vermelho próximo a 650 nm , valor compatível com os anteriormente obtidos.

Espectro de absorção de gases

Para se obter um espectro de absorção de um gás deve-se fazer com que uma radiação de espectro contínuo e intenso atravesse o gás de modo que este absorva as radiações com energias que lhe são características. Utilizaremos aqui como fonte uma lâmpada de sódio comercial que apresenta uma propriedade muito peculiar e bastante útil para a observação de linhas de



Figura 12. Lâmpada utilizada para a observação do fenômeno de absorção no vapor de Na.

absorção: à medida que aumenta sua temperatura, uma camada de vapor de sódio preenche o espaço entre o bulbo central de emissão e o seu bulbo externo (Figura 12). É essa camada de vapor de sódio que permitirá o processo de absorção.

A Figura 13 mostra o aparato experimental utilizado para a projeção do espectro de Na.

Assim que ligamos a lâmpada observa-se nitidamente as linhas amarelas de emissão do sódio características das transições que envolvem o seu estado fundamental (Figuras 14a e 14b).

No entanto, à medida que a temperatura aumenta inicia-se o processo de absorção das energias características das transições fundamentais e as linhas amarelas desaparecem do espectro conforme mostram as Figuras 15a e 15b.

Uma aplicação importante desse fenômeno reside no estudo dos gases das camadas atmosféricas das estrelas que acabam por absorver certos comprimentos de onda, deixando linhas escuras no espectro observado. Como cada elemento absorve apenas os comprimentos de onda que lhe são característicos, através destas linhas



Figura 13. Montagem utilizada para a observação do espectro de absorção do Na.

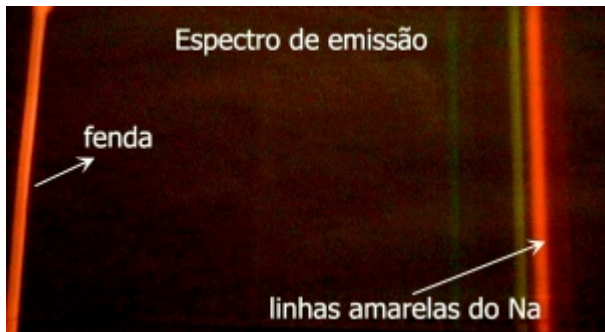


Figura 14a. Espectro de 1ª ordem do Na observado através de uma rede de 300 linhas/mm quando ligamos a lâmpada (nos primeiros 30 s).

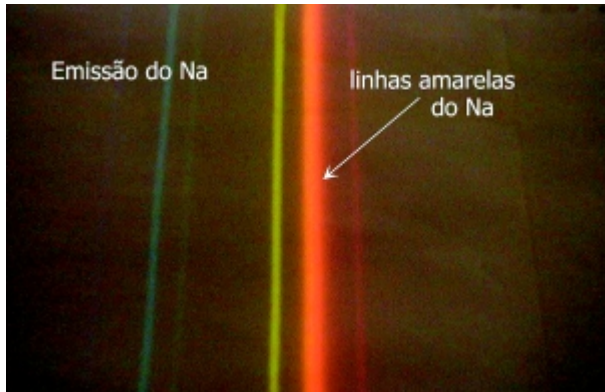


Figura 14b. Espectro de emissão do Na observado após 1 minuto. Após este intervalo de tempo começam a surgir as demais linhas de emissão características do Na.

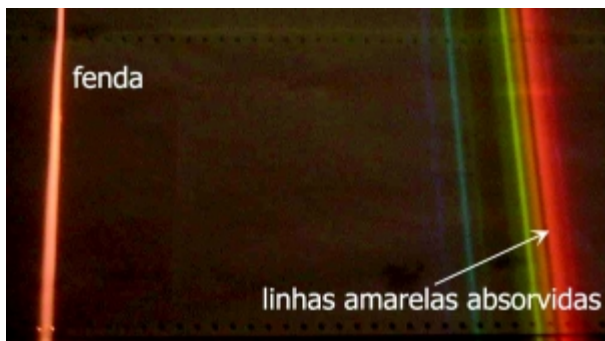


Figura 15a. Espectro observado transcorrido cerca de 3 minutos em que a lâmpada foi ligada.

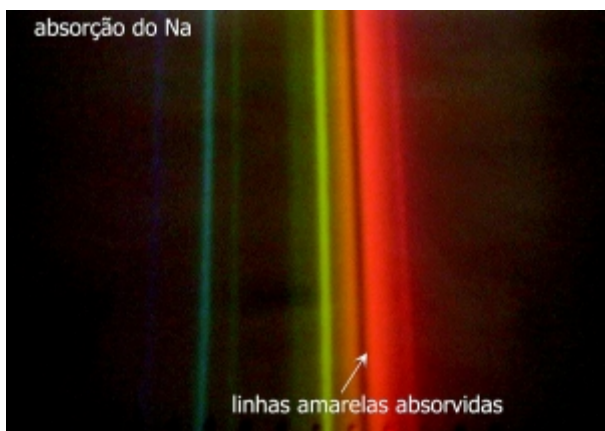


Figura 15b. Absorção das linhas associadas às transições que envolvem o estado fundamental do Na.

absorvidas podemos identificar os gases que compõem essas camadas atmosféricas.

Determinação da constante de Planck utilizando LEDs

Determinação da constante de Planck a partir do espectro de emissão de um LED

A determinação da constante de Planck a partir da radiação emitida por um LED é um método bem conhecido e os detalhes sobre este experimento podem ser vistos em Cavalcante e Tavolaro [6], onde determina-se a constante de Planck a partir de informações relativas à curva característica de um LED. Admite-se que a energia necessária para o acendimento de um LED é no mínimo igual à energia emitida pela radiação de maior intensidade. Podemos portanto dizer que a constante de Planck é determinada a partir da emissão de radiação de um LED.

Um diodo emissor de luz consiste em uma junção entre semicondutores fortemente dopados. De acordo com o diagrama de energias (Figura 16), ao aplicarmos um campo elétrico externo oposto à junção pn, estaremos polarizando-a diretamente, fazendo o diodo conduzir, isto é, a corrente elétrica obtida aumenta com a tensão aplicada.

Dessa forma, os elétrons de condução ganham energia suficiente para vencer a barreira de potencial e caminham para a região p. Podemos ver na Figura 16 que para os elétrons de maior mobilidade penetrarem na região p, a quantidade de energia mínima necessária é dada por:

$$eV_{\text{aplicada}} = E_G + \Delta E_F, \quad (3)$$

onde ΔE_F incorpora os efeitos do nível de Fermi e a distribuição de elétrons na banda de condução.

Quando o elétron passar para a região p, podemos ter uma recombinação entre elétrons e buracos e, como consequência, para cada transição teremos a emissão de um fóton com energia $h\nu$. Em geral, ΔE_F é muito pequeno e pode ser desprezado em primeira aproximação. Admitindo que a frequência de radiação de intensidade

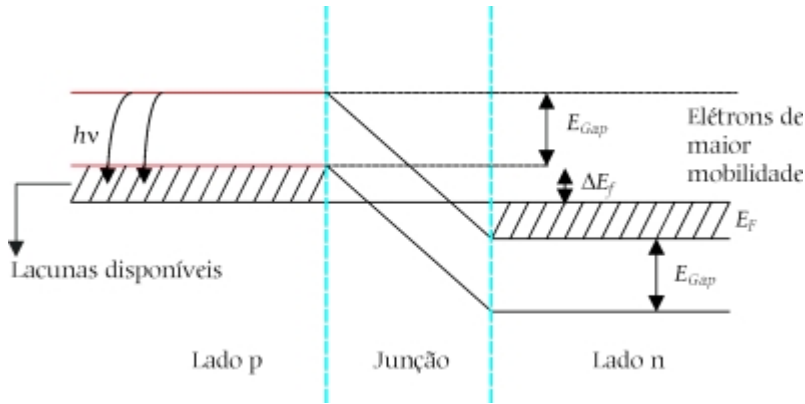


Figura 16. Diagrama de energias para uma junção p-n.

máxima pode ser escrita em termos do limiar de tensão (aquele valor para o qual o diodo começa a conduzir corrente), temos

$$h\nu = eV, \quad (4)$$

onde V corresponde ao limiar de tensão aplicada aos terminais do LED para fazê-lo acender e pode ser determinado através da curva característica do LED.

No entanto, caso se tenha interesse apenas em obter informações acerca da ordem de grandeza da constante de Planck, basta variarmos a tensão nos terminais do LED até que a luz emitida possa ser visualizada diretamente.

O esquema do circuito para a obtenção da ordem de grandeza da constante de Planck encontra-se na Figura 17.

O procedimento consiste em alterar a tensão aplicada aos terminais dos LEDs através do potenciômetro até que seja visualizada a luz de emissão de cada LED. O LED de maior comprimento de onda necessita de menor energia para acender. As Figuras 18a e 18b mostram um exemplo de montagem e os valores correspondentes de tensão para acendimento de cada um dos LEDs.

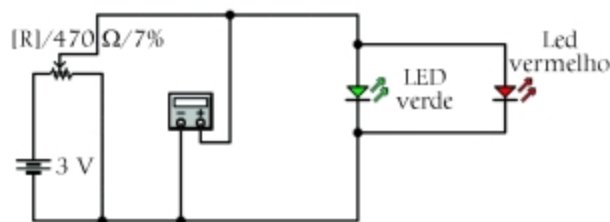


Figura 17. Diagrama elétrico para a obtenção da ordem de grandeza da constante de Planck.

Usando os resultados anteriores para o comprimento de onda do LED vermelho, isto é, um valor da ordem de 650 nm e a Eq. (4), obtém-se para a constante de Planck um valor de:

$$h = eV\lambda/c = 5,7 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Já para o LED verde obtivemos um valor de emissão da ordem de 560 nm, o que nos fornece um valor de $5,8 \times 10^{-34}$ J.s para a constante de Planck. Estes valores são muito satisfatórios se considerarmos todas as aproximações realizadas.

Determinação da constante de Planck a partir da absorção de um LED

Um LED, como todo semicondutor, aumenta sua condutividade à medida que fótons de energia correspondente a sua "banda de emissão" incidem sobre ele. Esta propriedade nos permite utilizar um LED como um sensor de radiação com uma resposta espectral definida pela largura de sua banda de emissão. Podemos dizer, portanto, que a corrente elétrica fornecida pelo LED, na incidência de uma radiação ressonante, é proporcional à intensidade de luz incidente.

Os LEDs vêm sendo utilizados como sensores de radiação em fotômetros solares [19-22] desde 1992, apresentando uma largura típica de resposta na região de 550 a 700 nm da ordem de 25 a 35 nm, o que nos permite selecionar adequadamente o comprimento de onda da radiação.

Um experimento muito simples pode ser



Figura 18a. O visor do voltímetro indica o valor de tensão necessária para o LED vermelho acender (1,65 V).

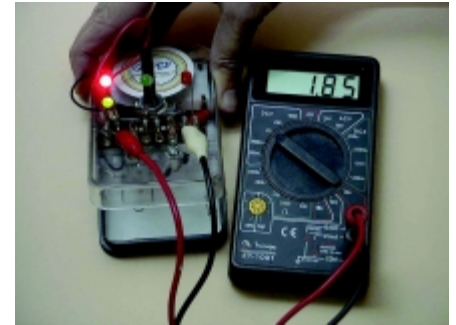


Figura 18b. O visor do voltímetro indica o valor de tensão necessária para o acendimento do LED verde (1,85 V). Observe que o LED vermelho neste caso encontra-se totalmente aceso, já que apresenta comprimento de onda maior e, portanto, requer menor energia para iniciar o seu processo de condução.

realizado de modo a comprovar a propriedade ressonante de um LED como sensor de radiação. Para isso basta conectar os terminais de um LED a um voltímetro (utilize escala máxima de 2 V) e inicialmente verifique sua resposta com o aumento da incidência de luz.

O próximo passo consiste em demonstrar a sua resposta ressonante. Um LED vermelho, por exemplo, responderá apenas a radiação de comprimento de onda na faixa de 600 nm. Para isso disponha diferentes filtros diante do LED e verifique que só se obtém um valor significativo para a tensão de saída na presença de um filtro vermelho. O LED verde, por sua vez, responderá significativamente para o filtro verde.

Uma outra observação muito interessante consiste em incidir sobre o LED verde um feixe de luz de uma ponteira laser. As ponteiros lasers comerciais em geral emitem radiação

de comprimento de onda de 630 a 680 nm, que não é ressonante para o LED verde mas o é para o vermelho.

Mesmo na presença de um feixe bastante intenso quanto o proveniente de uma ponteira laser, o LED verde é praticamente insensível. O único LED que responde de maneira significativa ao feixe da ponteira laser é aquele cuja resposta espectral intercepta a sua faixa de emissão, ou seja, o LED vermelho. Cavalcante e Haag [23] desenvolveram um trabalho que permite determinar a constante de Planck utilizando LEDs como sensores de radiação.

A Eq. (5) é a aproximação de Wien para a energia emitida por unidade de tempo e de área, à temperatura T e comprimento de onda λ no intervalo $d\lambda$, por um filamento de tungstênio aquecido:

$$I(\lambda)d\lambda = \frac{\bar{\epsilon}2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{h\beta c/\lambda}} d\lambda, \quad (5)$$

onde I é potência emitida pelo filamento de tungstênio, por unidade de área, por unidade de comprimento de onda, em um intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ em torno de λ , λ é o comprimento de onda, T é a temperatura em Kelvin, $\beta = 1/k_B T$, com k_B a constante de Boltzmann, h a constante de Planck, c a velocidade da luz e $\bar{\epsilon}$ a emissividade média do tungstênio (praticamente independente do comprimento de onda e da temperatura, que o caracteriza como um “corpo cinza”).

Analisando a equação, percebe-se que o gráfico de $\ln(I) \times 1/T$ deve nos fornecer uma reta cuja inclinação é dada por $hc/\lambda k_B$, permitindo portanto obter informações sobre a constante de Planck.

Nossa proposta é utilizar um LED como sensor da luz emitida pelo filamento e como consequência a corrente gerada será proporcional à intensidade de radiação incidente com comprimento de onda λ no intervalo $d\lambda$. O procedimento consiste em obter informações sobre a corrente ou tensão fornecida pelo LED em função da temperatura de aquecimento do filamento. É importante alertar para o fato de que, em geral, essa “fotocorrente” assume valores da ordem de poucos microampères e, como conse-

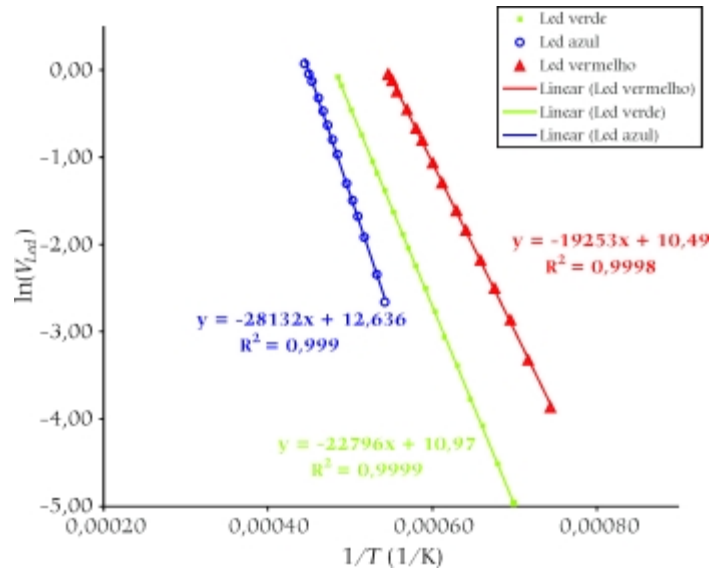


Figura 19. Gráfico obtido para a tensão nos terminais de cada LED em função da temperatura de aquecimento do filamento.

qüência, aconselha-se a utilização de um amplificador. Nos fotômetros solares tem sido utilizado como amplificador o CI 741, na configuração de conversor “corrente x tensão”, onde a corrente gerada é convertida em tensão. Nessa configuração, a tensão presente na saída do amplificador operacional, será linearmente proporcional à intensidade da radiação recebida pelo LED. Um esquema deste amplificador é descrito por Cavalcante e Haag [23]. No entanto é possível também obter medidas de tensão diretamente nos terminais de cada LED. Para isso devemos aproximar o LED da lâmpada de filamento. Ainda assim temos uma redução no número de pontos para baixas temperaturas, já que nesta região há um decréscimo significativo na intensidade de radiação emitida pelo filamento (aconselha-se trabalhar com tensões nos terminais do LED sempre abaixo de 1,0 V).

Os resultados obtidos para os LEDs vermelho, verde e azul estão indicados na Figura 19.

Observa-se facilmente a relação linear entre $\ln(V_{LED}) \times 1/T$, indicando a aplicabilidade da aproximação de Wien para o filamento.

Por outro lado, a constante de Planck pode ser obtida a partir da inclinação da reta, sendo dada por:

$$h = \text{inclinação da reta} \cdot \lambda k_B / c, \quad (6)$$

onde, em uma primeira aproximação, λ corresponde ao comprimento de onda da radiação de máxima intensidade emitida pelo LED. A Tabela 2 fornece os resultados obtidos.

Pode-se determinar experimentalmente o comprimento de onda de emissão do LED utilizando qualquer um dos métodos propostos neste trabalho. Os valores dos comprimentos de onda indicados na coluna 2 da Tabela 2, bem como as correspondentes larguras espectrais, foram obtidos por visualização direta através de um espectroscópio manual.

Verifica-se facilmente a partir da Eq. (6), que a relação entre as inclinações das retas obtidas para $\ln(V_{LED}) \times 1/T$ nos fornece a relação entre as frequências de emissão dos LEDs envol-

Tabela 2.

Cor do LED	Comprimento de onda e largura espectral (nm)	Inclinação da reta	Valor de h ($\times 10^{-34}$) J.s
Vermelho	649 ± 24	19253	$5,8 \pm 0,3$
Verde	562 ± 31	22796	$5,9 \pm 0,4$
Azul	459 ± 28	28132	$5,9 \pm 0,4$

Tabela 3.

Relações	Relação entre as inclinações das retas	Relação entre as frequências de emissão
Verde/Vermelho	1,18	$1,15 \pm 0,08$
Azul/vermelho	1,46	$1,41 \pm 0,11$
Azul/verde	1,23	$1,22 \pm 0,10$

vidos. A Tabela 3 apresenta a relação obtida para cada caso.

Nota-se que a precisão dos resultados obtidos neste experimento está limitada à largura de emissão de cada LED, o que é indicado na 3ª coluna e que para o pior caso nos conduz a precisões da ordem de 8%.

A concordância entre as relações indicadas nas colunas 2 e 3 da Tabela 3 nos leva a crer que os desvios observados para os valores da constante de Planck indicados na Tabela 2 devem ser

atribuídos principalmente a erros na determinação da temperatura do filamento. O cálculo dessa temperatura depende dentre outras variáveis da resistência elétrica do filamento a zero grau Celsius [23] e a estimativa desse valor é bastante difícil de ser efetuada. De qualquer modo, podemos dizer que a aproximação de Wien para a energia emitida pelo filamento foi verificada.

Conclusão

Neste trabalho procuramos dar

ênfase à caracterização das radiações que compõem o espectro eletromagnético. Os recursos de baixo custo e a metodologia desenvolvida constituem uma ferramenta tecnológica acessível para identificação das radiações no estudo dos mais variados tipos de estrutura, de gases a sólidos incandescentes. Atenção especial foi dedicada aos semicondutores - mostramos que LEDs comerciais podem substituir tanto as fontes como os sensores de luz na incansável e importante tarefa de verificar a validade de modelos através da determinação de constantes físicas: o modelo do *quantum* de luz e a constante de Planck. Dessa forma, esperamos contribuir para o enriquecimento das abordagens experimentais como estratégia para o ensino de física moderna no Ensino Médio.

Referências

- [1] F. Ostermann, L. Mendonça e C.J.H. Cavalcanti, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **20**, 437 (1998).
- [2] E.C. Valadares e A.M. Moreira, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **15**, 121 (1998).
- [3] C.E. Laburú, A.M. Simões e A.A. Urbano, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **15**, 1192 (1998).
- [4] F. Catelli, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **18**, 108 (2001).
- [5] M.A. Cavalcante, A. Piffer e P. Nakamura, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 108-112 (2001).
- [6] M.A. Cavalcante, C.R.C. Tavoraro, D. de S. Fagundes e J. Muzinatti, *Física na Escola* **3:1**, 24-29 (2002).
- [7] D.B. Junior, *Física Moderna: Tópicos para o Ensino Médio* (Editora Companhia da Escola, Campinas, 2002).
- [8] V.S. Bagnato, *Física na Escola* **1:2**, 4 (2001).
- [9] N. Studart, *Física na Escola* **4:2**, 4 (2003).
- [10] M.A. Cavalcante, V. Jardim e J.A.A. Barros, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 154 (1999).
- [11] M.A. Cavalcante e A. Di Benedetto, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **21**, 437 (1999).
- [12] H.J. Kalinowski e N.M.D. Garcia, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **7**, 64 (1990).
- [13] Garcia, N.M. e Kalinowski, H.J. "Um espectroscópio simples para uso individual". *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **11**, 134 (1994).
- [14] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **18**, 298 (2001).
- [15] F. Catelli, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 123 (1999a).
- [16] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *Física na Escola* **3:2**, 40 (2002).
- [17] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *Física Moderna Experimental* (Editora Manole, São Paulo, 2003)
- [18] M.G. Cornwall, *Phys Educ* **28**, 12 (1993).
- [19] F.M. Mims III, *Applied Optics* **31**, 6965 (1992).
- [20] B.Y. Acharya, A. Jayaraman, S. Ramachandran, and B.H. Subbaraya, *Applied Optics* **34**, 1209 (1995).
- [21] T.M. Sansosti, Led's Detectors, <http://laser.physics.sunysb.edu/~tanya/report2/>.
- [22] D.R. Brooks, F.M. Mims III, T. Nguyen, and S. Bannasch, *Globe Annual Meeting, Snowmass, Colorado*, 1998.
- [23] M.A. Cavalcante e R. Haag, XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física, 24 a 28 de janeiro de 2005, Rio de Janeiro, R.J. Livro de resumos, p. 101. Para acesso ao texto completo na página <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/>, sessão A12-1, painel P128.



Novidade

A Sociedade Brasileira de Química lançou o sexto *Caderno Temático de Química Nova na Escola* e dois CD-Roms especiais: um contendo os fascículos de *QnEsc* de números 1 a 20 e outro contendo os *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola* de números 1 a 5.

Maiores detalhes sobre esta publicação da SBQ, que já está em seu vigésimo primeiro número, pode ser encontrada no sítio da Sociedade:

<http://www.sbf1.sbfisica.org.br>

