

Lâmpada de Hg para experimentos e demonstrações de física moderna: introdução ao efeito fotoelétrico e outros tópicos

(Hg lamp for experiments and demonstrations in modern physics: introduction to the photoelectric effect and other topics)

Rafael Rodrigo Garofalo Paranhos, Victor Lopez-Richard¹ e Paulo Sergio Pizani

Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil

Recebido em 25/4/2008; Aceito em 28/8/2008; Publicado em 27/2/2009

Neste trabalho são apresentados os resultados de um projeto para o ensino de física moderna e contemporânea para um curso de licenciatura em física. Os objetivos do projeto consistiram no desenho, construção e utilização de uma lâmpada de vapor de Hg para atividades práticas e demonstrações didáticas. Questões relativas à utilização deste equipamento seguindo padrões de segurança serão detalhadas. Será dada ênfase à discussão metodológica para aplicações do instrumento na introdução do efeito fotoelétrico e outros assuntos da física moderna.

Palavras-chave: física moderna, efeito fotoelétrico, atividade experimental, demonstrações de física.

The results of an experimental project for contemporary and modern physics education will be exposed. The main goals were the design, building-up, and operation of a Hg vapor lamp for teaching and didactic demonstrations. Questions related to the use of the equipment by following safety standards will be detailed. A particular emphasis will be given to the methodological discussion for applications of the lamp to the introduction of the photo-electric effect and other topics within the scope of modern physics.

Keywords: modern physics, photoelectric effect, experimental activity, physics demonstrations.

1. Introdução

A inserção de conteúdos de física moderna e contemporânea (FMC) no ensino médio regular aparece como um dos objetivos das novas diretrizes para ensino de física [1]. Nelas, enfatiza-se a necessidade da aproximação do aluno com novas tecnologias e na reflexão e compreensão atualizada sobre fenômenos tais como a interação da radiação com a matéria. A viabilidade deste processo depende em grande parte de alternativas de abordagem deste conteúdo. Nesse contexto, discutem-se ferramentas metodológicas capazes de promover e exercitar competências do aluno, dando ênfase na compreensão fenomenológica de alguns temas ligados à FMC [2,3].

Nestas propostas, destacam-se as dificuldades decorrentes da intenção de evitar o caráter propedêutico na introdução de tópicos de FMC no ensino médio. Dentre elas está a falta de ferramentas auxiliares para o ensino, tais como práticas de laboratório e demonstrações experimentais. Tais ferramentas são elementos indispensáveis para a implementação das novas estratégias didáticas. Os efeitos destas carências podem ser reduzidos com instrumentos virtuais como é

proposto por vários autores ou pela utilização de engenhosas propostas de baixo custo [4]. Este trabalho insere-se dentro deste tipo de iniciativa.

A preocupação de criar formas de introduzir a FMC de forma correta e concisa nasceu de discussões realizadas na disciplina Instrumentação para o Ensino de Física Moderna, o presente trabalho. Neste tipo de proposta pretende-se que o aluno de licenciatura em física seja capaz de colocar em prática ferramentas de pesquisa, planejamento e caracterização experimental do funcionamento de dispositivos demonstrativos de ensino, assim como na elaboração de propostas metodológicas e didáticas para sua utilização. O objetivo concreto do trabalho é fornecer subsídios para o fomento a práticas e demonstrações de FMC e em particular: (i) uma proposta à introdução do efeito fotoelétrico, e (ii) alternativas para a utilização do equipamento em práticas e demonstrações de outros fenômenos quânticos e relativísticos. Assim, este trabalho está subdividido em três seções fundamentais. A primeira é dedicada à descrição instrumental da proposta do equipamento, à caracterização do seu funcionamento e medidas de segurança. Na segunda é detalhada a proposta metodológica do tratamento do

¹E-mail: vlopez@df.ufscar.br.

efeito fotoelétrico e suas vantagens e, na terceira, a descrição de fenômenos ópticos facilmente detectáveis relacionados ao espectro de emissão do vapor de Hg, na região visível.

2. Instrumentação

As propriedades espectrais do Hg podem ser usadas como um importante atrativo para sua utilização na demonstração de diversos efeitos quânticos e relativísticos. Assim, na construção do instrumento foi utilizada uma lâmpada de vapor de Hg comercial, da qual foi extraído o bulbo de proteção que contém fósforo capaz de absorver a radiação ultravioleta. Porém, este tipo de procedimento introduz desafios relacionados à segurança, que ficarão expostos nesta proposta. É importante destacar que lâmpadas comerciais de vapor misto de Hg submetidas ao mesmo procedimento ficariam inutilizadas por possuírem um filamento de tungstênio que não pode ficar exposto fora do vácuo do bulbo. Uma vez escolhida a lâmpada, as exigências da tarefa de instrumentação se concentraram na criação de um equipamento seguro, durável, fácil de manipular e de transportar, robusto e adaptável a diferentes tipos de usos. Assim, a segunda etapa consistiu no desenho e confecção do invólucro da lâmpada seguindo tais critérios. Esta tarefa envolveu a escolha dos materiais, montagem e acabamento.

Os materiais foram escolhidos seguindo, principalmente, os critérios de segurança e de durabilidade. O invólucro deveria, assim, seguir os seguintes padrões:

proteger ao máximo o manipulador e observadores da radiação emitida, possuir mecanismos eficientes de ventilação e resfriamento, possuir mecanismos de aterramento, permitir a instalação de filtros e lentes na saída da luz. Todos os detalhes do material utilizado para a montagem da lâmpada, assim como seus custos em valores relativos à época da sua construção estão indicados na Tabela 1. Na Fig. 1 mostra-se o desenho da caixa protetora da lâmpada com suas dimensões.

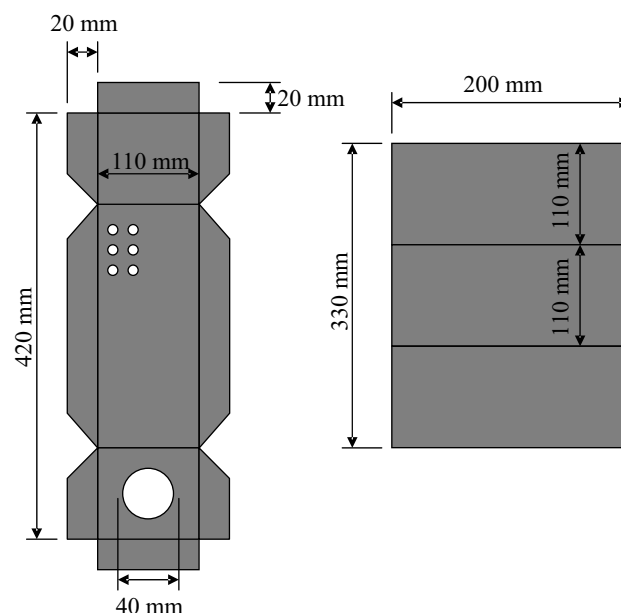


Figura 1 - Desenho esquemático da caixa de proteção da lâmpada de UV

Tabela 1 - Lista de materiais utilizados para a construção da caixa e preços em Reais segundo cotações em novembro de 2007

Materiais	Especificações	Preço (R\$)
Tomada macho c/ terra		3,00
Cabo de força	2 m de cabo PP 3X 1,5mm	3,50
Soquete	01 unidade, Louça E-27	1,00
Reator	Keiko	50,00
Lâmpada de vapor de Hg	1 unidade, Philips (HPL-N) 125 W /220 V, Base E-27	7,00
Caixa de ferro	Ferro de 1,0 mm espessura, Dimensões: 200 × 110 × 100 mm	50,00
Dissipadores	10 unidades de alumínio	13,00
Ventoinhas (coolers)	2 unidades, 110/220 V, Dimensões 80 × 80 × 30 mm	100,00
Chave liga/desliga	1 unidade, Botão tipo DPDT	9,00
Acrílico	Retalhos	0,00
Filtro fotográfico (UV)	1 unidade, 52 mm de diâmetro	15,00
Pé de apoio	4 unidades (cabo de vassoura)	0,00
Tinta Spray	1 unidade, Color Gin cor prata	16,00
Parafusos e porcas	Diversos tamanhos	6,00
Total		274,00

O controle da temperatura do invólucro foi uma das maiores preocupações do projeto para evitar altas temperaturas da caixa, que inviabilizariam seu manu-

seio e diminuiria a vida útil da própria lâmpada. Para a solução deste problema foram colocadas duas ventoinhas com suas devidas furações para a refrigeração

e circulação do ar. A Fig. 2 mostra o resultado da montagem. Para avaliar a eficiência do sistema de refrigeração e caracterizar seus efeitos foram realizadas medidas da temperatura da caixa protetora utilizando termopares cujos resultados são mostrados na Fig. 3. As medidas foram realizadas à temperatura ambiente a partir de 17 °C. No gráfico observa-se a temperatura crescer durante 13 min até estabilizar-se a 36 °C. Deve-se alertar que, somente após 3 min aproximadamente, a lâmpada funciona com sua eficiência máxima e que o reator, necessário para seu funcionamento, atinge a temperatura máxima de 60 °C. Portanto, deve ser manuseado com cuidado.

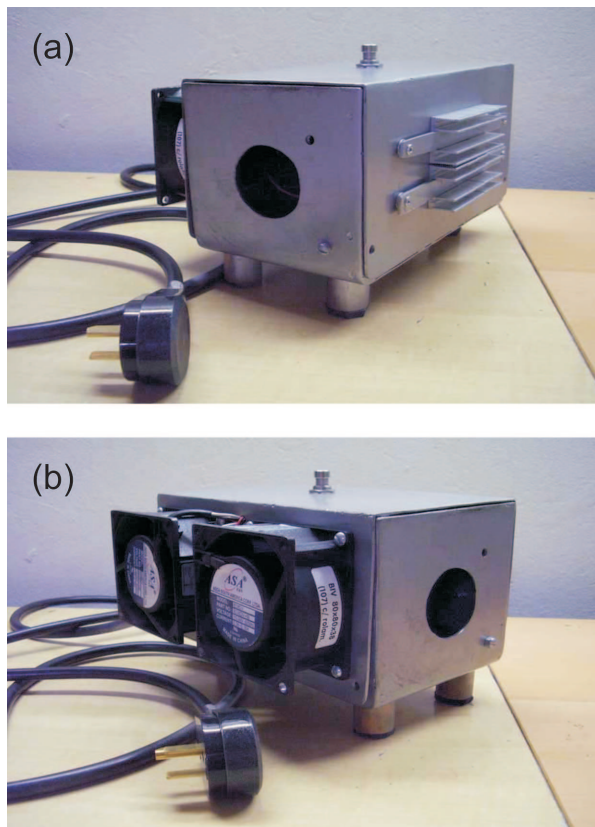


Figura 2 - Fotografia da lâmpada com a caixa protetora. (a) Em destaque, os dissipadores de alumínio. (b) Em destaque as ventoinhas (coolers).

3. Efeitos nocivos na utilização de lâmpadas de mercúrio

3.1. Emissão de raios ultravioletas

O vapor de Hg, uma vez excitado, apresenta linhas de emissão nas três faixas em que se subdivide a radiação ultravioleta: UVA (de 315 a 400 nm), UVB (de 280 a 315 nm) e UVC (de 100 a 280 nm). Delas, as frequências UVA e UVB são consideradas as mais nocivas à saúde e qualquer procedimento que envolva exposição a elas deve ser acompanhado de medidas preventivas e mitigadoras da exposição da pele e olhos aos

seus efeitos. Não sendo uma radiação ionizante, não existem normas brasileiras disponíveis para regulamentar a utilização deste tipo de fonte em ambientes de trabalho. Porém, existem referências a normas vigentes em outros países que esclarecem os procedimentos para a criação de protocolos de utilização segura deste tipo de instrumento como indicado na Ref. [5].

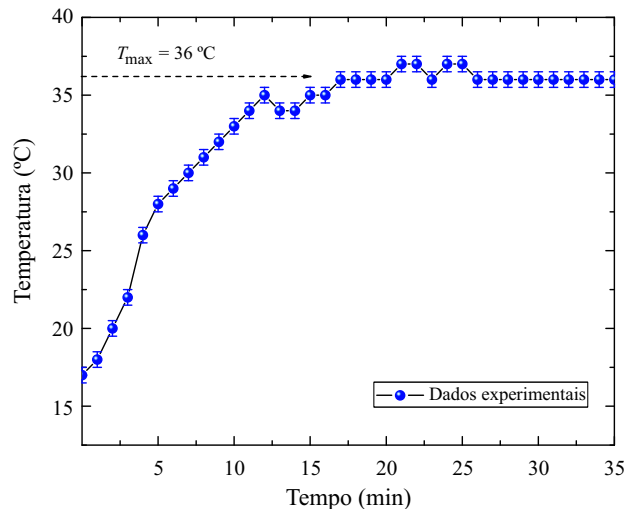


Figura 3 - Dados experimentais da temperatura da caixa protetora vs. o tempo de funcionamento da lâmpada. A temperatura de estabilidade do equipamento, $T = 36$ °C, está indicada com a linha pontilhada.

Como padrões de precaução, recomenda-se o uso de anteparos que evitem a exposição de observadores e manipuladores à radiação (vidros podem ser utilizados devido a sua absorção de radiação nas frequências do ultravioleta), a exigência de equipamento pessoal de segurança para proteger corpo, mãos e olhos: óculos com filtro de ultravioleta, roupas que cubram todo o corpo, seguindo indicações sobre tecidos (e corantes) com maior poder de absorção [6] e luvas.

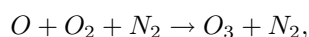
Em termos de protocolos de segurança, existe porém um detalhe do funcionamento de lâmpadas de vapor de Hg que não deve ser negligenciado: a formação de ozônio a partir da incidência da radiação no ar.

3.2. Liberação de ozônio

Durante o funcionamento da lâmpada de Hg é liberado ozônio. Este processo, no ambiente do laboratório, simula exatamente uma das etapas da dinâmica dos componentes atmosféricos em grandes altitudes. Para os comprimentos de onda de emissão no ultravioleta as moléculas de oxigênio podem-se decompor absorvendo fótons da radiação



Subsequentemente, os átomos de oxigênio assim gerados, irão compor moléculas de ozônio ao interagir com suas moléculas diatômicas segundo o processo



onde a molécula de nitrogênio, N_2 , atua como catalisador da reação. Desta maneira, a geração de ozônio pela lâmpada, também considerado nocivo para a saúde em altas concentrações, deve ser levada em conta na montagem experimental para que possa ser extraído do ambiente com facilidade. A colocação do sistema de resfriamento da lâmpada pode auxiliar na montagem de um sistema de exaustão do gás para fora do ambiente do experimento.

4. Efeito fotoelétrico

Uma vez elaborada a proposta, conjuntamente com os protocolos de manuseio e utilização seguros, passamos a discutir propostas metodológicas de sua utilização para fins didáticos. Primeiramente, abordaremos uma iniciativa para introduzir o efeito fotoelétrico.

Propostas demonstrativas sobre o efeito fotoelétrico utilizam frequentemente duas abordagens: experiências de caráter quantitativo realizadas em sala de aula [7-10] ou experimentos virtuais, com simulações computacionais utilizando *Applets* [11]. A nossa proposta consiste em uma atividade experimental demonstrativa complementar às anteriores, onde os recursos cognitivos do aluno possam ser exercitados de maneira que ele seja induzido a elaborar uma hipótese científica sob a supervisão do professor. Conjuntamente, podem ser discutidos elementos históricos de fenômenos quânticos desde sua descoberta até sua explicação. Na introdução à FMC, criam-se mitos tais como: “Albert Einstein descobriu o efeito fotoelétrico pelo qual lhe foi atribuído o Prêmio Nobel de Física”. Este tipo de afirmação aparece com frequência entre alunos dos nossos cursos de instrumentação e consideramos que a proposta de introdução do efeito fotoelétrico e sua fenomenologia devem servir, também, como espaço para discutir e elucidar tais assuntos, eliminando certos “mitos” da história da física.

Certamente, 20 anos após a publicação em 1865 dos resultados de Maxwell, segundo os quais existiam ondas eletromagnéticas que se propagavam à velocidade da luz e, que a luz seria uma dessas ondas [12], a teoria do eletromagnetismo era ainda um movimento pioneiro obtendo espaços nos ambientes científicos, principalmente na Europa continental. Para seu sucesso, também seriam determinantes confirmações experimentais das suas previsões. Entre 1886-1887, foram os empenhos metódicos de H. Hertz que forneceram a demonstração cabal da validade da teoria eletromagnética de Maxwell ao tempo que, por combinações fortuitas de circunstâncias e um poder de observação privilegiado, permitiram a descoberta de intrigantes fenômenos, cuja caracterização iniciaria o caminho que levaria à reformulação das teorias clássicas. Em 1887, Hertz publica

seu trabalho “Sobre uma influência da luz ultravioleta na carga elétrica”, [13] onde aparece a descrição inequívoca do que se denominou, tempos depois, efeito fotoelétrico, e uma primeira tentativa de sua caracterização através de análises espectrais da radiação incidente que o provocava.

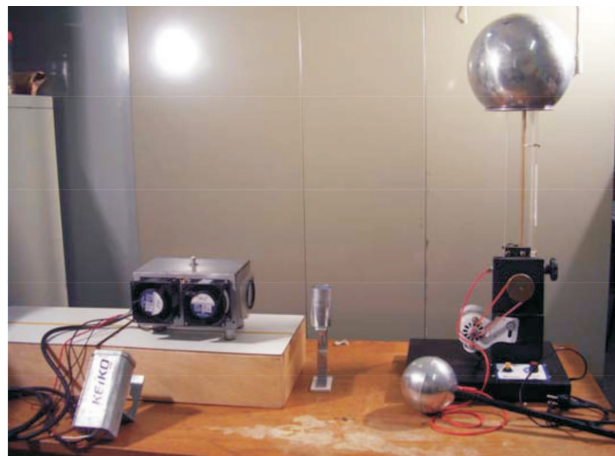


Figura 4 - Fotografia da montagem experimental para o estudo do efeito fotoelétrico.

Porém, foi o discípulo de Hertz, Wilhelm Hallwachs quem daria ao novo efeito uma caracterização mais sistemática utilizando o eletroscópio, ao ponto de indicar importantes conclusões revelando, assim, elementos intrigantes da natureza do fenômeno [14]. A nossa proposta experimental está baseada nesta abordagem. Para isso utilizamos um eletroscópio de alumínio da Phywe e um gerador de Van der Graff com a montagem ilustrada na Fig. 4. As observações foram realizadas em seis configurações:

- (a) Eletroscópio carregado negativamente e posteriormente iluminado com a lâmpada de Hg, sem filtro UV;
- (b) Eletroscópio carregado positivamente e posteriormente iluminado com a lâmpada de Hg, sem filtro UV;
- (c) Eletroscópio carregado negativamente e posteriormente iluminado com a lâmpada de Hg, com filtro UV;
- (d) Eletroscópio carregado positivamente e posteriormente iluminado com a lâmpada de Hg, com filtro UV;
- (e) Eletroscópio carregado negativamente e posteriormente iluminado com luz branca intensa de lâmpada incandescente;
- (f) Eletroscópio carregado positivamente e posteriormente iluminado com luz branca intensa de lâmpada incandescente;

Após realizadas as experiências, podemos facilitar a elaboração de hipóteses que caracterizem o efeito utilizando as seguintes questões:

- (1) Que tipo de carga é dissipada pela influência da radiação?

(2) Qual tipo de radiação é capaz de provocar a dissipação?

(3) Como a intensidade da radiação incidente afeta o fenômeno?

Este tipo de questão inexoravelmente levará a outras:

(4) Por que o efeito é unipolar?

(5) Qual é a diferença entre as duas formas de electricidade reveladas pelo fenômeno?

(6) Por que a carga negativa é dissipada?

Neste ponto, é importante contextualizar de que maneira poderia ser interpretado o assunto na época da sua observação em 1887, 10 anos antes da descoberta do elétron por Thomson. A discussão iniciada desta maneira permite abordar sistematicamente os avanços que aconteceram entre a descoberta do efeito em 1887 até sua explicação fenomenológica radical dada por Einstein em 1905 e o papel deste último como unificador de uma visão quântica de fenômenos naturais, dentre eles: radiação do corpo negro, fotoluminescência e o efeito fotoelétrico. Também é possível abordar o aprofundamento ulterior da compreensão deste fenômeno uma vez atingida uma visão mais elaborada da estrutura da matéria e suas propriedades eletrônicas. Esta abordagem facilita [15]:

- O desenvolvimento de atividades que desafiem as competências de raciocínio do aluno;

- A análise de questões de índole histórica e epistemológica referidas à noção de ciência, características do trabalho científico, evolução das idéias na ciência, formulação de hipóteses e postulados;

- A discussão de fenômenos de natureza quântica, analisados através de diversas perspectivas, de maneira que o aluno tenha a possibilidade de construir novos esquemas mentais que permitam abordar situações que requeiram a reformulação de conceitos clássicos.

5. Espectroscopia de átomos

Como indicado previamente, a lâmpada de Hg usada para este trabalho de instrumentação deveria possibilitar sua utilização em outras tarefas experimentais. Nesse sentido, enfatizou-se o fato de que o espectro de emissão do Hg é um dos mais conhecidos e que a lâmpada pode ser utilizada para calibrar aparelhos de espectroscopia. Previamente, fez-se necessário elucidar se possíveis impurezas na composição do vapor da lâmpada poderiam interferir em seu espectro de emissão. Para isso a luz da lâmpada foi caracterizada utilizando um espectrômetro Jobin-Yvon U1000 com uma janela de detecção entre 350-870 nm.

O resultado destas medidas está indicado na Fig. 5, onde aparece o espectro de emissão detectado com e sem o uso do filtro UV. Todas as linhas detectadas pertencem exclusivamente ao espectro de emissão do mercúrio; logo a lâmpada construída resulta em um

bom padrão de calibração. Na Fig. 5 foram indicados os valores nominais da emissão do Hg extraídos da Ref. [16] e as respectivas transições entre os níveis atômicos indicados em notação espectral. Note-se que, em praticamente todas as linhas, aparece um leve deslocamento para o vermelho. Este efeito tem sido amplamente estudado e atribuído à pressão do vapor dentro da lâmpada [17].

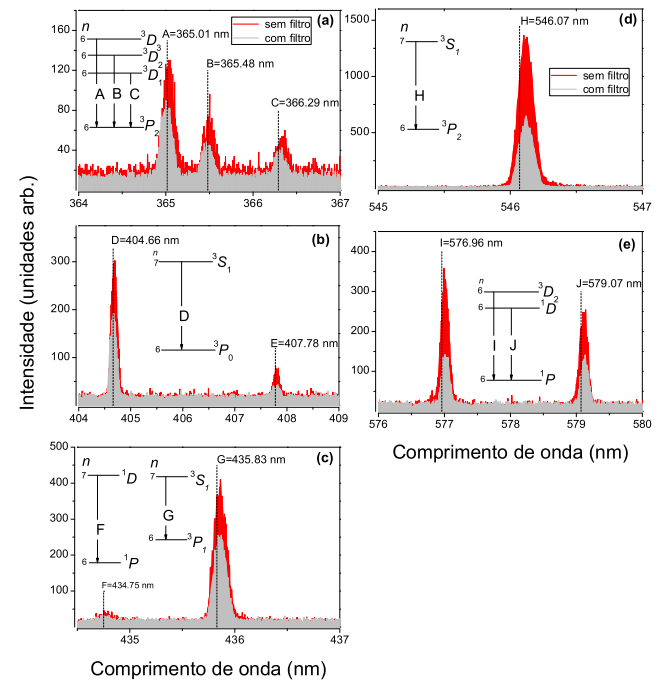


Figura 5 - Espectros de emissão da lâmpada para várias regiões do visível.

Em várias propostas demonstrativas de FMC sugere-se a utilização de montagens simples para a construção de espectrômetros utilizando CDs comerciais como redes de difração [18]. Seguindo estas sugestões, foi montada uma demonstração para relacionar o espectro obtido na Fig. 5 com o espectro gerado a partir de um CD comercial (rede de difração com 625 ranhuras/mm [18]). Na Fig. 6, está ilustrada a fotografia da montagem da demonstração e seu resultado, no espectro detalhado no painel superior. As correspondentes transições, seguindo a notação da Fig. 5, foram também indicadas. No espectro de segunda ordem, destacaram-se 4 linhas nitidamente: duas violetas, uma verde e outra amarela.

Este resultado fornece elementos ilustrativos para a discussão da natureza dos espectros de emissão atômicos para sistemas de dois elétrons na última camada tipo s: correlação com números quânticos e regras de seleção. É interessante constatar, também, que as linhas D, H e G são linhas correspondentes às transições: $^3S_1 \rightarrow ^3P_0$, $^3S_1 \rightarrow ^3P_1$ e $^3S_1 \rightarrow ^3P_2$ (linhas 404,66 nm, 435,83 nm e 546,07 nm, respectivamente). Logo, a separação destas linhas corresponde à estrutura

fina relacionada à interação spin-órbita resultando em uma evidência de correções relativísticas à formação do espectro de emissão.

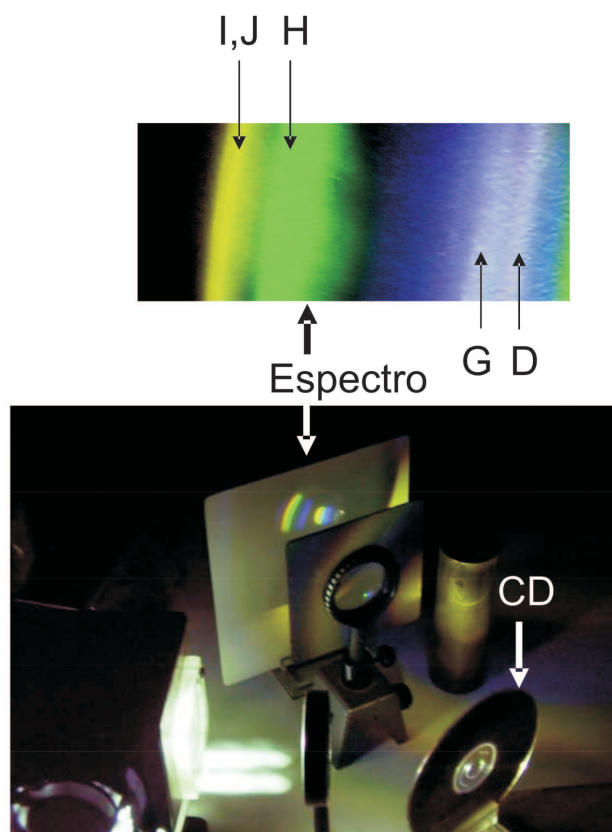


Figura 6 - Fotografia da montagem experimental para a caracterização espectral da emissão da lâmpada utilizando um CD comercial como rede de difração e o espectro obtido (de segunda ordem) com as linhas correspondentes indicadas seguindo a notação da Fig. 5.

6. Conclusões

O projeto de instrumentação apresentado neste trabalho forneceu desafios variados para o desenvolvimento de competências práticas, didáticas e de pesquisa para alunos de licenciatura em física. Desde o projeto até a implementação de atividades práticas com os instrumentos construídos, foram realizados estudos dos tópicos relacionados à FMC e aos riscos da utilização de radiação ultra-violeta em ambientes de trabalho. Foi importante constatar a falta de regulamentação sobre a utilização deste tipo de instrumento que pudesse auxiliar na formatação de protocolos de segurança adequados para a utilização do equipamento em laboratórios de ensino.

A lâmpada de Hg comercial pode ser utilizada em práticas e demonstrações com diversos fins. Neste trabalho, ficaram expostas algumas propostas metodológicas para a utilização destas observações em ati-

dades didáticas, em particular: a introdução do efeito fotoelétrico, a análise do espectro de emissão do Hg e suas particularidades relacionadas às regras de seleção e às evidências de correções relativísticas.

Referências

- [1] http://www.sbfisica.org.br/arquivos/PCN_FIS.pdf
- [2] M.R. Dubeux Kawamura e Y. Hosoume, *Física na Escola* **4:2**, 22 (2003).
- [3] L.C. de Menezes, *Física na Escola* **1:1**, 6 (2000).
- [4] C.R.C. Tavoraro e M.A. Cavalcante, *Física Moderna Experimental* (Manole, São Paulo 2003).
- [5] *Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Materials and Protection Against Ultraviolet Radiation* (ARPANSA, Australia, 2004). Disponível em http://www.arpansa.gov.au/RadiationProtection/Factsheets/is_upf.cfm.
- [6] Luis Filipe Folgado Carneiro Leite Fernandes, *Determinação da Proteção Solar de Tecidos em Função da Estrutura, Cor e Umidade*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2003.
- [7] J. Bernardes da Rocha Filho, M.A. Salami e V. Hillebrand, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 555 (2006).
- [8] M.A. Cavalcante, C.R.C. Tavoraro, D.F. de Souza e J. Muzinatti, *Física na Escola* **3:1**, 24 (2002).
- [9] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *Cad. Cat. Ens. Fís* **18**, 298 (2001)
- [10] F. Ostermann e M.A. Moreira, *Investigações em Ensino de Ciências* **5**, 2 (2000).
- [11] Exemplos de *Applets* sobre efeito fotoelétrico: <http://www.walter-fendt.de/ph14e/photoeffect.htm>, <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap28/PhotoEffect/photo.htm> e <http://www.sc.edu/esbweb/fisica/default.htm>
- [12] J.C. Maxwell, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **155**, 459 (1865).
- [13] H. Hertz, *Annalen der Physik* **31**, 983 (1887).
- [14] W. Hallwachs, *Annalen der Physik* **33**, 301 (1888).
- [15] Irene Arriaseq Balverde, *La Enseñanza y el Aprendizaje de la Teoría Especial de la Relatividad en el Nivel Medio/Polimodal*. Tese de Doutorado, Universidad de Burgos, 2008.
- [16] P.A. Tipler, *Foundations of Modern Physics* (Worth Publishers, New York, 1969), p. 342.
- [17] V. Kaufman, *J. Opt. Soc. Am.* **52**, 866 (1962); Craig J. Sansonetti, Marc L. Salit and Joseph Reader, *Applied Optics* **35**, 74 (1996); H. Skenderovic and V. Vujnovic, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **55**, 155 (1996).
- [18] P. Gluck, *Physics Teacher* **40**, 468 (2002); A. Byrne, *Physics Teacher* **41**, 144 (2003); Marisa Almeida Cavalcante, Cristiane Rodrigues Caetano Tavoraro e Rafael Haag, *Física na Escola* **6**, 75 (2005).