
LABORATÓRIO DE ÓTICA: UM CURSO DE CARÁTER FORMATIVO

Paulo Henrique Dionísio
Instituto de Física – UFRGS
Porto Alegre – RS

Resumo

É descrito um modelo de um curso de laboratório de Física básica de caráter formativo, cujos temas centrais são a dinâmica do procedimento experimental, a interação experiência-teoria, a estrutura lógica e conceitual do conteúdo e a própria essência da Física como ciência experimental. É relatada uma experiência usando este modelo em um curso de laboratório de Ótica, cujos resultados são analisados qualitativamente a partir da opinião informal dos alunos e dos professores.

I. Introdução

Dedicar-se à Física significa desenvolver uma permanente atividade de investigação. A busca se inicia na observação e na experimentação e atinge o ponto culminante com a elaboração de teorias, que são estruturas complexas compostas por elementos tais como definições, convenções, conceitos, princípios e leis. Um leigo pode confundir os elementos de uma teoria em um emaranhado onde não se reconhecem as funções específicas de cada um, mas para o especialista eles aparecem logicamente ordenados e conectados sobre um arcabouço matemático adequado. O propósito fundamental de uma teoria é oferecer uma descrição consistente e abrangente de uma determinada classe de fenômenos, e sua abrangência pode ser progressivamente ampliada, uma vez que continuamente novos resultados experimentais vão sendo obtidos, novos modelos teóricos e recursos matemáticos vão sendo desenvolvidos e novas interpretações e projeções acerca do comportamento da natureza vão surgindo.

O ensino de Física básica objetiva prioritariamente a transmissão de conhecimentos já estabelecidos. Os livros de texto e os currículos procuram cobrir cada área de conteúdo em toda a sua extensão. A preocupação maior é de natureza didática: como tornar acessível, assimilável, tamanha massa de informações. Como consequência de tal diretriz, a Física tem sido muitas vezes apresentada como um corpo de conhecimentos estático, definitivamente estabelecido, a respeito do qual tudo o que

resta fazer é assimilá-lo. A dinâmica natural de um sistema em expansão raramente se torna aparente nos cursos básicos. Outra consequência, decorrente da necessidade de organizar didaticamente os conteúdos para facilitar a assimilação, é a perda da estrutura original, a quebra de hierarquia entre os elementos constituintes. Assim, é comum confundirem-se convenções com conceitos básicos, princípios com suas consequências, isto sem mencionar que os modelos teóricos, apesar de suas limitações inerentes, são muitas vezes apresentados como a própria verdade da natureza. A consequente percepção da Física como um universo confuso pode bem ser uma das causas de atitudes inconvenientes dos alunos, que confundem estudar com memorizar fórmulas e se mostram inábeis para analisar situações, responder questões conceituais e resolver adequadamente os problemas que lhes são propostos.

Outra atitude freqüentemente encontrável nos estudantes é o desinteresse pelos fenômenos. Muitas vezes uma bela demonstração, habilmente encenada pelo professor, não merece deles a devida atenção. Com efeito, se um determinado fenômeno já foi coerente e consistentemente explicado no âmbito de uma teoria universalmente aceita, conforme exposto no livro de texto ou na aula teórica, que necessidade há de observá-lo? Aulas de laboratório planejadas especialmente para verificar relações já deduzidas ou demonstrar fenômenos já descritos carecem, então, de significado e atrativos para os estudantes. Mas, mesmo aí, revelam uma perspectiva falha. Afinal, Maxwell também “deduziu” a existência das ondas eletromagnéticas, mas ele próprio, Hertz e tantos outros não dispensaram a verificação experimental de sua existência...

II. Modelo de curso

Considerações como as expostas acima levaram-nos a cogitar da possibilidade de se organizar um curso de laboratório de caráter eminentemente formativo, cujas atividades contivessem as características marcantes de um processo de investigação e cujos temas centrais fossem a dinâmica do procedimento experimental, a interação experiência-teoria, a estrutura lógica e conceitual do assunto em estudo e o próprio significado essencial da Física como ciência experimental. Estabelecemos, então, algumas condições a serem satisfeitas para que o curso adquirisse o caráter desejado, condições estas que configuram o nosso modelo de curso:

- 1) Cada atividade deve ser proposta ao aluno de modo que fique claro o seu objetivo, seja ele inferir uma lei ou relação entre grandezas, verificar a validade de uma relação deduzida teoricamente ou simplesmente medir o valor de uma grandeza.

2) Os pressupostos teóricos a respeito do sistema em estudo, os conceitos e definições envolvidos, as leis que “a priori” se admitam deva o fenômeno obedecer, devem ser explicitamente mencionados e logicamente ordenados.

3) O esquema de montagem, a rotina a ser seguida na coleta de dados, os cuidados especiais destinados a minimizar erros sistemáticos, etc. devem ter suas razões claramente colocadas pelo professor e discutidas pelos alunos.

4) O aluno deve ser solicitado a agir independentemente na interpretação de suas observações, criticamente na análise dos dados e criteriosamente no estabelecimento de conclusões.

5) O uso de procedimentos estatísticos e da Teoria de Erros deve surgir espontaneamente como decorrência natural da necessidade de estimar a confiabilidade dos dados, resultados e conclusões.

6) O aluno deve ser estimulado a estabelecer relações entre suas conclusões e o conteúdo teórico que antecede e sucede o conteúdo do experimento no contexto geral do assunto em estudo (na situação ideal, o aluno realizaria a experiência motivado por discussões anteriores e concluiria a tarefa com novas motivações e novos temas para discussão).

7) O equipamento deve ser o mais simples possível, de modo a não distrair a atenção dos objetivos principais.

Parece-nos desnecessário justificar a relação das condições acima com o desejado caráter formativo do curso. Vale ressaltar que optamos por um modelo de curso no qual a atividade do aluno é dirigida. Tal orientação foi estabelecida em parte pela constatação da dificuldade dos alunos em projetarem adequadamente seu próprio experimento, em parte para garantir que esteja à disposição todo o material necessário. O importante, em nossa opinião, é fazer o aluno agir conscientemente, e não apenas “seguir a receita” (ver a condição 3). Pode ocorrer que, ao discutirem o procedimento sugerido, os alunos o modifiquem ou mesmo adotem um procedimento próprio. Espera-se que em disciplinas mais avançadas de laboratório os alunos adquiram cada vez mais autonomia neste sentido.

III. O curso

Material instrucional elaborado de acordo com o modelo proposto tem sido usado desde 1980 na disciplina Física Experimental IV, oferecida pelo Departamento de Física da UFRGS para alunos do quarto semestre dos cursos de Física e Química. O programa da disciplina consta da realização de experiências de Ótica. Na seqüência normal dos currículos, deve ser cursada simultaneamente com uma disciplina teórica de conteúdo correspondente. O curso compreende catorze experiências, a saber:

- 1) Estudo da reflexão e da refração da luz.
- 2) Determinação do índice de refração de um prisma usando-se um disco ótico. Estudo da dispersão.
- 3) Estudo da dispersão com o auxílio de um espectrômetro.
- 4) Lentes convergentes: propriedades e distâncias focais.
- 5) Lentes divergentes: propriedades e distâncias focais.
- 6) Espelhos côncavos e convexos.
- 7) O biprisma de Fresnel. Avaliação do comprimento de onda da luz.
- 8) Interferência em películas delgadas.
- 9) Interferência e difração da luz.
- 10) Estudo de redes de difração. Determinação do comprimento de onda da luz.
- 11) Medida do comprimento de onda da luz usando-se um espectrômetro de rede de difração.
- 12) Polarização da luz.
- 13) Atividade ótica.
- 14) O espectro do Hidrogênio.

Em termos logísticos, trabalhamos com turmas de no máximo quinze alunos subdivididos em grupos de dois ou três, e dispomos de uma sessão semanal com duas horas e meia de duração. As atividades são propostas por meio de um roteiro escrito e cada aluno deve apresentar um relatório escrito individual. Os roteiros refletem a orientação geral do curso: propõem as atividades de maneira adequada, respeitando as condições 1 e 2 acima; orientam a montagem e o procedimento de coleta de dados; encaminham a análise dos resultados. É deixada maior autonomia ao estudante no que diz respeito à obtenção de conclusões, à análise de suas conseqüências e à crítica de seu valor. A interação pessoal aluno-professor, ocorrida em aula e realimentada mediante anotações por escrito nos relatórios, é essencial ao desenvolvimento de uma ação consciente e de uma atitude crítica por parte dos alunos.

O relato comentado de algumas atividades do curso ilustrará melhor a aplicação do modelo proposto. A segunda experiência, por exemplo, tem como objetivo principal estabelecer a variação do índice de refração com o comprimento de onda da luz. Utiliza-se o procedimento clássico de determinação do índice de refração de um prisma a partir do ângulo de desvio mínimo⁽¹⁾, relacionados através da expressão:

$$n = \frac{\text{sen}[(A + D)/2]}{\text{sen}(A/2)},$$

onde A é o ângulo do vértice do prisma, n o seu índice de refração e D o ângulo de desvio mínimo. Utiliza-se equipamento semelhante ao do conjunto Bender: fonte luminosa, disco ótico (com escala dividida de meio em meio grau), um prisma equilátero de lucite e filtros vermelho e azul. Os pressupostos teóricos a respeito do sistema são claros: o fenômeno é regido pela Lei de Snell, já estabelecida na primeira experiência, de cuja aplicação decorre⁽²⁾ à expressão 1. Os alunos são instruídos a tomar providências no sentido de minimizar erros grosseiros e sistemáticos: posicionar corretamente o prisma, medir muitas vezes, corrigir o posicionamento a cada nova medida, etc.

Tabela I – Ângulos de desvio mínimo D para luz passando através de um prisma equilátero de lucite. Os números no corpo da tabela indicam a frequência com que cada valor ocorreu para cada cor filtrada na fonte. Precisão de leitura: um quarto de grau. $\langle D \rangle$ indica a média dos valores de D , s_D é o desvio padrão da medida e $s_{\langle D \rangle}$ é o desvio padrão da média.

D (graus)	Filtro	
	vermelho	azul
$34 \frac{3}{4}$	1	–
35	1	–
$35 \frac{1}{4}$	4	1
$35 \frac{1}{2}$	3	1
$35 \frac{3}{4}$	1	2
36	–	5
$36 \frac{1}{4}$	–	1
$\langle D \rangle$	35,30	35,85
s_D	0,27	0,27
$s_{\langle D \rangle}$	0,09	0,09

A Tabela 1 mostra, na parte superior, uma coleção de valores de D obtidos para luz de duas cores diferentes. A respeito destes dados, o professor poderá ouvir de um aluno a seguinte conclusão: “A distribuição de frequências e as medias indicam, mediante simples inspeção, que o valor de D não é o mesmo para diferentes cores”. Caberá então ao professor objetar que esta conclusão não é aceitável, pois não se tem uma idéia da confiabilidade das medidas e, principalmente, das medias calculadas. Estará, assim, acionando a condição 5. O procedimento que costumamos indicar para estabelecer intervalos de confiança para os resultados experimentais engloba os seguintes passos:

1) Calcular os desvios padrões das medidas e das médias. Expressar as médias e desvios padrões com um número de algarismos significativos compatível com os desvios dos desvios padrões⁽³⁾.

2) Estabelecer o erro de leitura e_L definido como a metade da diferença entre os dois valores mais próximos capazes de serem discriminados em operações de medida.

3) Comparar o erro de leitura com o desvio padrão da medida. Se $e_L < s_D$, os resultados podem ser interpretados⁽⁴⁾ de acordo com a Teoria de Erros e o resultado da medida será expresso como (média: desvio padrão da média). Se $e_L > s_D$ as variáveis estatísticas carecem de sentido e o resultado será expresso como (média $\pm e_L$).

No caso da Tabela 1, $e_L = 1/8$ de grau, ou seja, menor do que s_D de modo que se chega aos seguintes intervalos de confiança para o índice de refração:

$$\text{Luz vermelha} \rightarrow D = (35,30 \pm 0,09)$$

$$\text{Luz azul} \rightarrow D = (35,85 \pm 0,09).$$

Como a intersecção dos intervalos é nula, conclui-se pela diferença entre os ângulos de desvio mínimo para luz de cores diferentes.

Esta é certamente uma forma simplificada de tratar os dados experimentais. Não permite, por exemplo, estabelecer o nível de significância estatística da diferença observada. Nosso objetivo, no entanto, é apenas mostrar ao aluno a necessidade de uma análise cuidadosa dos dados antes de se tentar qualquer conclusão. Outro aspecto importante a ser apreendido é que, mediante repetição das medidas e tratamento estatístico adequado, pode-se obter o valor de uma grandeza com precisão bem maior do que à primeira vista o equipamento disponível parece permitir (para outro exemplo desta situação, ver a Referência 5). Colocações como estas parecem-nos indispensáveis em um curso que se propõe a auxiliar o estudante na formação de uma visão clara da Física e do papel que a experiência representa em sua construção.

Evidentemente, a conclusão que se obtiver a respeito dos D 's propagar-se-á aos índices de refração. No presente caso, os cálculos apontam os intervalos $n = 1,478 \pm 0,001$ para luz vermelha e $n = 1,485 \pm 0,001$ para luz azul.

Os dados da Tabela 1 na verdade não são típicos, mas decorrem de um experimento realizado com muito cuidado e habilidade. Muitas vezes os alunos não conseguem um ajuste satisfatório do equipamento, e um maior erro de leitura mascara a variabilidade das medidas e impede que conclua pela diferença entre os índices de refração. Do ponto de vista usualmente adotado nos cursos de laboratório, esta é então uma experiência que freqüentemente “dá errado”, devendo, portanto, ser descartada. Do nosso ponto de vista, no entanto, sejam quais forem os dados obtidos, a atividade é útil à formação do aluno, pois o coloca em posição de exercitar a análise e o

senso crítico. O objetivo é treiná-lo em extrair o máximo possível de informações do experimento, mas não mais do que o possível. Mesmo na pior das hipóteses, um aluno bem orientado poderá formular uma conclusão do seguinte teor:

“Os dados obtidos não evidenciam qualquer dependência do índice de refração com a cor da luz. Tal dependência, no entanto, parece ser sugerida pelo fato de a luz branca sair do prisma decomposta. Se conseguíssemos medir com mais precisão, usando equipamento mais sensível, poderíamos tentar uma experiência mais conclusiva”.

Tal aluno, ao dispor de um espectrômetro na terceira experiência, estará certamente apto a estabelecer com convicção a curva de dispersão de um prisma.

Há também no curso atividades de caráter menos formal. Na experiência sobre polarização, por exemplo, há uma etapa que consiste em observar a luz espalhada de um feixe que passa através da água e interpretar as observações em termos do modelo microscópico usualmente adotado para os fenômenos de espalhamento. Aqui, a ênfase é colocada na dicotomia fenômeno – modelo. O aluno deve exercitar-se em distinguir o fenômeno e as grandezas observáveis que servem para descrevê-lo das suposições teóricas propostas com o fim de explicar o comportamento do sistema. Esse tipo de exercício destina-se principalmente a estabelecer uma estrutura conceitual, uma hierarquia no corpo de conhecimentos que o estudante vai adquirindo. Para ilustrar melhor, transcrevemos abaixo a introdução ao roteiro da décima segunda experiência.

“No decorrer das seis primeiras experiências, dedicamo-nos ao estudo de fenômenos da Ótica Geométrica. Para a completa descrição de tais fenômenos, não necessitamos, em momento algum, de qualquer consideração acerca da natureza da luz. Bastaram-nos as leis da reflexão e da refração, a cuja obtenção nos dedicamos na primeira experiência. É verdade que as leis da reflexão e da refração podem ser obtidas a partir de um modelo ondulatório, como o Princípio de Huygens, mas também podem ser obtidas de um princípio como o de Fermat, que nada supõe sobre a natureza da luz. Em outras palavras, o estudo dos fenômenos da Ótica Geométrica não nos conduz ao conhecimento da natureza da luz”.

A partir da sétima experiência, passamos a estudar fenômenos de interferência e de difração (Ótica Física). A fim de interpretar adequadamente tais fenômenos, foi necessário atribuir à luz um comportamento ondulatório. Já possuímos, portanto, algumas indicações acerca da natureza física da luz. Nosso conhecimento, no entanto, ainda está muito limitado, pois não temos ainda nenhuma indicação experimental sobre o caráter e a natureza das ondas luminosas.

Será nesta experiência, ao analisarmos fenômenos ditos de “polarização”, que reconheceremos nas ondas luminosas uma assimetria em torno da direção

de propagação, assimetria esta que nos indicará tratarem-se de ondas transversais. Ademais, a experiência será conduzida de modo a verificarmos que os fenômenos de polarização podem ser adequadamente interpretados se supusermos ser a luz uma radiação de natureza eletromagnética.

O roteiro segue com a apresentação do modelo usual para o espalhamento da luz, cujas premissas são sua natureza eletromagnética e seu caráter transversal. A radiação de um dipolo é brevemente recapitulada conforme a Fig. 1(a) e a existência de luz espalhada é proposta conforme a Fig. 1(b). A seguir, os estudantes observam a luz espalhada de um feixe de luz polarizada que passa através de um balão esférico de vidro, conforme mostra a Fig. 2. A identificação do fenômeno com o modelo é imediata, e a aceitação da natureza eletromagnética da luz pelo estudante se dá de forma natural. Como subproduto destas observações, o estudante pode “calibrar” seu polaróide, ou seja, determinar sua direção característica de polarização, podendo então usá-lo para outros fins, como, por exemplo, a determinação do estado de polarização da luz refletida em uma superfície, etc.

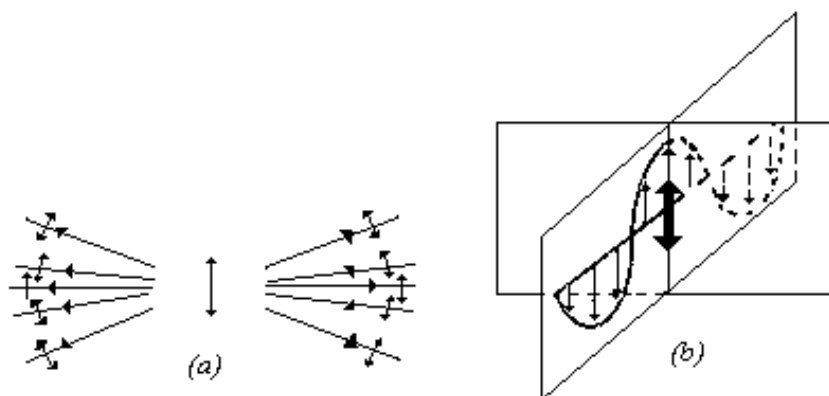


Fig. 1 - (a) Representação de um dipolo elétrico oscilante. A seta dupla central indica a direção do vetor p , momento de dipolo. As cargas $+e$ que compõem o dipolo vibram ao longo da direção da seta, alterando posição e distância, de modo que p varia periodicamente em módulo e sentido. As linhas radiais indicam a direção e a intensidade da radiação emitida e as setas duplas a elas associadas indicam a direção de vibração do campo elétrico da radiação. O fenômeno possui simetria axial em torno da direção da seta dupla central.

(b) As setas simples representam o campo elétrico associado à luz que incide sobre uma partícula localizada em P . As cargas que compõem a partícula oscilam sob a ação do campo na direção da seta dupla e passam a emitir radiação (luz) de acordo com o que mostra a Fig. 1 (a).

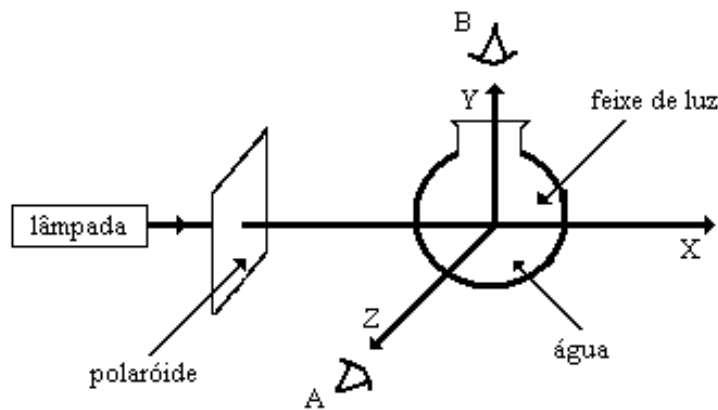


Fig. 2 - Um feixe de luz polarizada é feito passar através de um balão esférico de vidro contendo água. Pode-se ajustar o polaróide de modo que o observador veja luz espalhada na posição A, mas não na posição B. Girando-se então o polaróide de 90 graus, o observador passa a ver luz espalhada em B mas não em A

IV. Avaliação e conclusão

Cabe-nos inicialmente fazer uma ressalva. Embora o material instrucional elaborado respeitando as sete condições acima esteja em uso desde 1980, isto não significa que o curso esteja sendo ministrado de acordo com o modelo proposto ao longo de todo este tempo. Isto porque os diferentes professores que têm passado pela disciplina podem ter imprimido enfoques diferentes, de acordo com a visão e a concepção peculiar de cada um a respeito do papel das aulas de laboratório na formação dos estudantes. A avaliação que segue, diz respeito, portanto, às ocasiões em que o autor atuou como professor.

Em apenas uma ocasião procedeu-se a uma avaliação objetiva do curso, baseada em um instrumento especialmente elaborado para tal fim. O resultado foi inteiramente concordante com as avaliações informais colhidas no contato direto com os alunos. A evidência mais clara de que o curso tem sido bem sucedido é o sentimento, freqüentemente expresso pelos estudantes, de que o mesmo foi interessante e útil para a sua formação. O aspecto positivo mais mencionado é a simplicidade do equipamento, que coloca o estudante em contato direto com o fenômeno. Isto, no entanto, pode ser uma característica geral dos laboratórios de Ótica, onde quase sempre é possível observar diretamente os fenômenos, alguns de considerável beleza plástica. A queixa maior surge com respeito ao tratamento estatístico dos dados, mas logo os estudantes se convencem de que isto é essencial para um trabalho sério, o que de certa forma constitui uma evidência de que estamos a caminho da realização dos objetivos do curso. Vale mencionar também a importância dada por muitos alunos a discussões que podemos qualificar como “de caráter epistemológico” (como a mencio-

nada dicotomia fenômeno-modelo), o que pode estar a evidenciar a conveniência, se não a necessidade, de oferecer-lhes uma disciplina voltada para esses assuntos.

Do ponto de vista do professor, fica a sensação de que os alunos desenvolvem as atividades com muita seriedade. Embora considerem a confecção de relatórios uma tarefa desgastante, procuram em geral dar-lhes essência e consistência. O enfoque sob o qual as atividades são colocadas faz com que as discussões em classe não se limitem a detalhes práticos de execução das tarefas, mas se voltem muitas vezes para o significado do que está sendo feito e para o conteúdo teórico envolvido no experimento. A Física deixa assim de ser algo que já foi feito alhures, que nos cumpre apenas aprender e tende a se tornar algo que vive e se desenvolve dentro do nosso laboratório.

V. Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Bernardo Buchweitz pela parceria na elaboração do material instrucional e ao Prof. Fernando L. da Silveira pelas discussões sobre o tratamento estatístico de dados experimentais.

VI. Referências Bibliográficas

1. WATSON, H. **Práticas de física**. Barcelona: Labor, 1950.
2. SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W. **Física**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1976. v. 2.
3. HELENE, O. A. M.; VANIN, V. R. **Tratamento estatístico de dados em física experimental**. São Paulo: Edgar Blücher, 1981.
4. SILVEIRA, F. L.; DIONÍSIO, P. H.; BUCHWEITZ, B. Inferência sobre a média de uma grandeza a partir de um conjunto de dados: um aspecto relacionado com a sensibilidade das medidas. **Ciência e Cultura**, v. 36, n. 10, p. 1492-6, 1983.
5. SILVEIRA, F.L. Estudo empírico da relação entre o período e a amplitude de um pêndulo simples. **Cad. Cat. Ens. Fis.**, v. 3, n. 3, p. 134-7, 1986.