

*Francisco Catelli  
Scheila Vicenzi  
Universidade de Caxias do Sul  
Caxias do Sul - RS*

***Resumo***

*É descrito o material e os detalhes da montagem de um interferômetro de Michelson de baixo custo. A fonte de luz é um laser de diodo ("laser pointer"), o divisor de feixe consiste em uma lâmina espessa de acrílico ou vidro, e os espelhos de primeira face são improvisados com lentes de óculos de sol, cuja convexidade elimina a utilização da lente expansora. O posicionamento dos "espelhos" é feito com massa de modelar e as vibrações mecânicas são evitadas, montando o sistema sobre uma laje de pedra. Um escurecimento moderado da sala é suficiente, já que as franjas de interferência apresentam bom contraste.*

**I. Introdução**

Há pelo menos duas fortes razões para motivar o estudante que interage com o dispositivo experimental, conhecido pelo nome de "Interferômetro de Michelson". A primeira delas surge ao tomar contato com as idéias<sup>xix</sup> que levaram Michelson e Morley a executar, no final do século XIX, seus hoje famosos experimentos. Sem entrar em detalhes<sup>xx</sup>, a meta de ambos era a determinação da diferença entre dois tempos de percurso de um feixe de luz. No primeiro, a direção e o sentido de propagação coincidia com a direção e sentido da velocidade orbital da Terra em relação a um meio no qual esta (e os demais corpos celestes) estaria imersa, o "éter". No segundo, tratava-se do mesmo percurso, percorrido pela luz desta vez de modo perpendicular à direção do movimento da Terra. A diferença entre estes tempos resultava, previa-se, das diferentes velocidades nos dois casos. Como é sabido, esta diferença não foi encontrada. Uma explicação fascinante para este resultado insólito é a de que, no mundo das velocidades próximas à da luz, a soma destas não se dá de maneira usual. Por exemplo, designando "C" à velocidade da luz no espaço vazio,  $C + C$  não é, como prevê o senso comum, igual a  $2C$ , e sim  $C + C = C$ ! Os estudantes certamente se encantarão com esta "matemática" bizarra (é claro que a decisão de

aprofundar mais o assunto depende de cada situação, mas estará garantido, de qualquer modo, o nascimento de uma curiosidade no estudante que não se extinguirá tão cedo). Uma conseqüência deste experimento foi um gradual abandono da idéia de éter, numa época em que nascia a relatividade especial de Einstein.

A segunda fonte de motivação decorre da estratégia experimental estabelecida por Michelson e Morley para encontrar a diferença de tempos prevista: ocorre que, em determinadas condições, luz mais luz dá... escuro! Uma das montagens experimentais, que levam a um encontro inesquecível com esta "álgebra" estranha da adição de feixes de luz, ostenta justamente o nome de "interferômetro de Michelson", o qual descreveremos a seguir, numa versão cujo custo é muito baixo, menos de 30 Reais, e com dificuldades experimentais de pequena monta, facilmente superáveis.

## II. Princípios básicos do interferômetro de Michelson

A idéia chave que permite compreender o interferômetro de Michelson é justamente a "álgebra estranha" acima referida. A idéia da luz como sendo uma onda é perfeitamente adequada neste contexto, e dela nos serviremos para encaminhar uma descrição simplificada deste dispositivo. As "ondas de luz", representadas na figura 1, todas de mesmo comprimento de onda, ao se sobreporem, "somam-se", o que é simples de intuir ao visualizar os desenhos. Os casos extremos dizem respeito ao que é chamado de "interferência completamente construtiva" (Fig.1(a)) e "interferência completamente destrutiva" (Fig.1(b)). No primeiro caso, as ondas de mesmo comprimento "coincidem" perfeitamente, e a soma de ambas dá uma nova onda idêntica, porém com o dobro da amplitude. No segundo caso, o máximo da primeira onda coincide perfeitamente com o mínimo da segunda, e a soma de ambas dá zero (aqui aparecem as determinadas condições às quais nos referíamos acima, nas quais "luz+luz = escuro"). Na Fig.1(c) aparece também um caso intermediário, onde a interferência nem é completamente construtiva nem completamente destrutiva.

Vamos agora a uma descrição sumária do interferômetro de Michelson. O "truque" consiste em dividir um feixe de luz em dois e, em seguida, recombina-lo, resultando daí a interferência descrita acima. A divisão do feixe pode ser concretizada a partir de uma lâmina espessa de material transparente, o divisor de feixe DF da Fig.2. A recombinação dos feixes faz-se reenviando-os ao divisor através de dois espelhos. Após atravessá-lo, os feixes são expandidos por uma lente (convergente ou divergente) e, ao se sobreporem, geram as "franjas de interferência" (zonas claras e escuras), as quais podem ser visualizadas num anteparo.

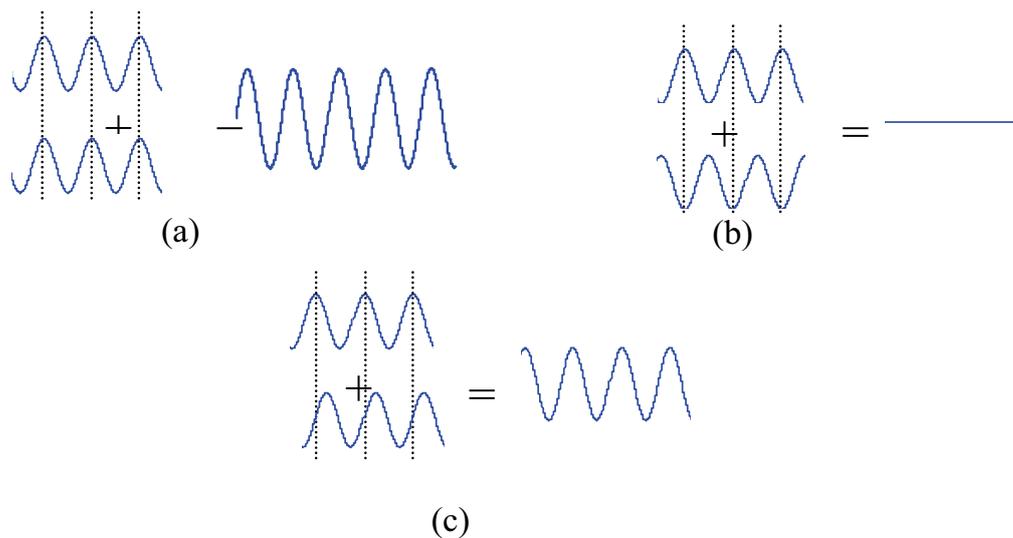


Fig.1 - (a): Interferência completamente construtiva. Na (b), a interferência é completamente destrutiva e, na (c), é representado um caso intermediário. A intensidade de luz resultante é máxima em (a), menor em (c) e nula em (b).

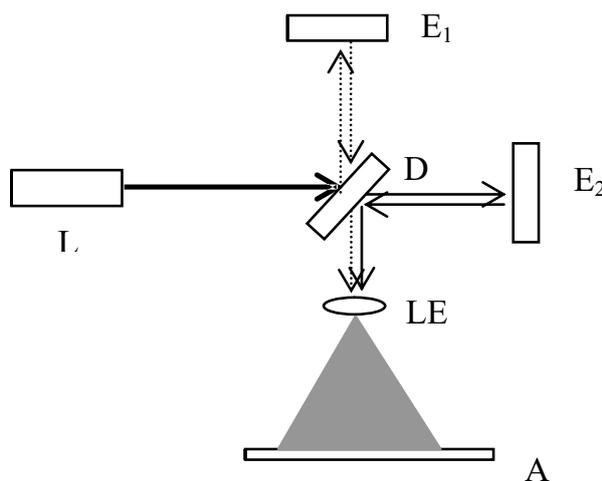


Fig.2 - Vista superior (esquemática) de uma montagem clássica do interferômetro de Michelson. L é a fonte de luz, em geral um laser, DF é o divisor de feixe,  $E_1$  e  $E_2$  são espelhos de primeira face (o espelhamento é feito na face que recebe diretamente a luz), LE é a lente expansora e A, o anteparo. Um dos ramos foi representado por setas pontilhadas e o outro por setas cheias, de modo que o leitor possa melhor acompanhar os caminhos da luz. Há outras reflexões internas na lâmina que não foram representadas para não sobrecarregar a figura.

## II. Construção do interferômetro

Alguns detalhes contribuem para emprestar uma certa dificuldade a esta montagem. Os espelhos de primeira face não são fáceis de obter, além de terem um custo relativamente alto. A mesma observação vale para o laser, em geral de HeNe. A fixação das peças é feita freqüentemente sobre chapas ou mesas metálicas, por meio de bases magnéticas, o que aumenta ainda mais o custo. Em pelo menos um dos espelhos é empregado usualmente um dispositivo com parafusos, o qual permite o posicionamento preciso do feixe refletido, o que pressupõem ou suportes de espelho importados ou fabricados em uma oficina bem equipada. No que diz respeito à montagem, aparece uma dificuldade adicional, que é o problema da estabilidade mecânica do sistema: as vibrações devem ser evitadas, caso contrário será impossível visualizar o padrão de interferência.

A conjunção destes fatores talvez explique porque os interferômetros não são comuns em atividades de ensino de Física no ensino médio e mesmo em nível de terceiro grau. Nos parágrafos seguintes relatamos como as dificuldades acima foram todas superadas, com material de baixo custo e através de uma estratégia de posicionamento dos feixes, que nos pareceu bastante simples de dominar.

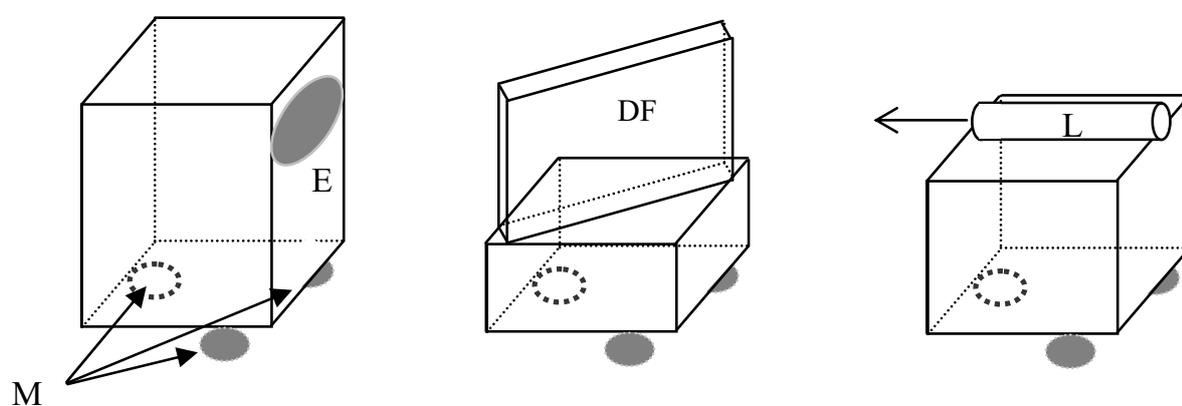
Vamos a cada uma das partes do sistema. A fonte de luz, hoje extremamente comum, barata e fácil de adquirir é o laser de diodo - o modelo tipo "chaveiro"<sup>xxi</sup> pode ser encontrado até mesmo em camelôs, a partir de 15 reais. O leitor lembrará que, ao descrevermos o fenômeno da interferência das ondas de luz, falávamos em "feixes de luz de mesmo comprimento de onda", condição que é plenamente satisfeita pelo laser diodo, o qual emite (para as finalidades aqui descritas) luz praticamente de uma cor só, luz "monocromática". As franjas de interferência também são visíveis com luz branca, porém o ajuste do interferômetro torna-se excessivamente delicado.

Um divisor de feixe barato e eficiente consiste em uma lâmina espessa, de acrílico ou vidro transparente. Ela pode ser obtida a partir de retalhos, junto aos instaladores de box para chuveiros, por exemplo. Nos divisores comerciais, uma das faces da lâmina é parcialmente espelhada, entretanto, a quantidade de luz refletida numa lâmina comum, sob uma incidência de aproximadamente  $45^\circ$ , como é o caso aqui, é perfeitamente suficiente para garantir a visualização de franjas de interferência com bom contraste. Dê preferência a lâminas mais espessas, nestas as reflexões parasitas ficam mais separadas umas das outras no anteparo, e conseqüentemente atrapalharão menos.

O problema dos espelhos de primeira face foi resolvido de maneira simples: escolha, por exemplo, em lojas de "tudo por 1,99", o par de óculos de sol com as lentes mais espelhadas que você encontrar. Estas "lentes", que na verdade não "aumentam" nem "diminuem" (diz-se que elas têm grau zero), funcionarão aqui como espelhos; os feixes que se originam no divisor serão refletidos pela parte convexa destes. Sendo convexos, esses "espelhos" propiciarão uma grande vantagem adicional: o feixe de luz

(que é colimado ao sair do laser) expande-se ao ser por eles refletido. Elimina-se assim a necessidade da lente expansora, o que simplifica a montagem (há um elemento a menos com que se preocupar) e torna-a mais barata. Espelhos feitos com pedaços de CD também funcionam. Porém, nos testes realizados, as franjas de interferência não ficam tão nítidas, além de a montagem exigir a lente expansora. Com base nos testes por nós realizados, os melhores resultados foram obtidos com as lentes de óculos de sol.

O problema dos parafusos de ajuste dos espelhos e divisor foi resolvido com... massa de modelar! Os espelhos são colados (com massa de modelar, SuperBonder®, Araldite®, etc.) na parte frontal superior de uma das faces de cubos de madeira de dimensões aproximadas de  $(8 \times 8 \times 8)$  cm<sup>3</sup> (veja a figura 3).

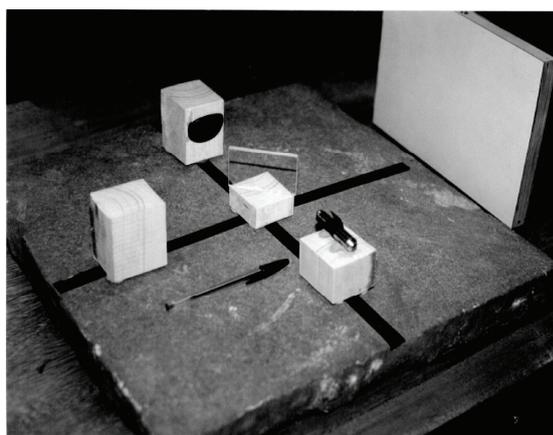
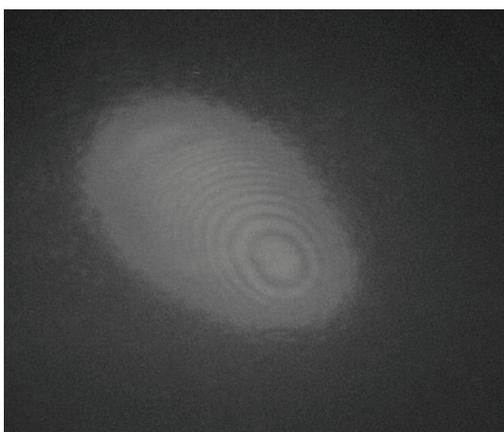


*Fig.3- Na parte inferior dos suportes de madeira são coladas três pequenas bolas de massa de modelar (MM), as quais por sua vez repousarão sobre uma laje de pedra de dimensões aproximadas de 50 cm por 50 cm por 8 cm. Uma pequena pressão sobre os blocos deformará a massa, permitindo ajustes bastante precisos. Para a montagem do interferômetro são necessários dois suportes de espelho (E, na figura), um suporte para o divisor de feixe DF e um suporte para o laser (L). O anteparo, que não aparece nas figuras, pode ser improvisado até com uma caixa de sapatos recoberta por uma folha branca.*

A montagem do interferômetro não exigirá cuidados muito especiais. Como "mesa", use uma laje de pedra, destas usadas para pavimentar calçadas. Num dos protótipos montados usamos uma laje de  $(50 \times 50 \times 8)$  cm<sup>3</sup>, apoiada sobre uma mesa comum de laboratório. Uma medida adicional contra as vibrações mecânicas consiste em repousar a laje sobre uma lâmina de espuma de uns 2 cm de espessura; não foi, entretanto, necessário adotar esta providência nos protótipos que testamos.

#### IV. Montagem e ajustes para obtenção das franjas de interferência

Vamos agora à disposição das diversas peças ópticas. Em primeiro lugar, trace duas linhas perpendiculares que se cruzam no centro da laje, estas linhas podem ser executadas, por exemplo, com tiras de fita isolante. No cruzamento das linhas, coloque o divisor de feixe DF; use como referência a Fig.1 e a foto da figura 4. A aresta maior da lâmina do divisor formará um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  com qualquer um dos ramos. Coloque em seguida o laser (mantenha-o ligado por intermédio de uma fita adesiva colada sobre a chave) numa das extremidades de um dos braços da cruz, apontando o feixe para o centro do divisor (lembre-se que a regulagem é feita pressionando o suporte de madeira contra os apoios feitos com massa de modelar). Note que o feixe de laser fica dividido em vários: um atravessa o divisor, enquanto que os outros serão refletidos por este (há várias reflexões: a mais forte ocorre na primeira face do divisor, as outras ocorrem internamente. Em geral duas aparecerão nitidamente, a da primeira face e mais uma, interna, da segunda face). A próxima etapa consiste em posicionar os espelhos. O primeiro refletirá, de volta pelo mesmo caminho, o feixe que atravessou diretamente o divisor. Este feixe será refletido por este mesmo divisor e irá iluminar um anteparo, posicionado a uma distância de 30 a 50 cm da borda da pedra; fora desta. Trata-se agora de enviar de volta ao divisor o raio refletido (como referido acima, dois deles são bem visíveis): coloque o outro espelho no segundo ramo ajustando-o de modo que os raios por ele refletidos incidam primeiramente no divisor e, após terem-no atravessado, apareçam projetados no anteparo. A altura das manchas neste último deve ser aproximadamente a mesma do feixe que emana da fonte de luz. Ajuste as distâncias de cada um dos espelhos ao centro do divisor, para que sejam iguais com uma tolerância de alguns milímetros (use uma régua comum); mesmo que os caminhos ópticos dos dois ramos não sejam exatamente os mesmos, esta providência simplificará a montagem sem comprometer o surgimento das franjas.



*Fig.4 - À esquerda, foto das franjas de interferência obtidas com a montagem descrita no texto, a qual aparece à direita.*

Como é possível visualizar as franjas de interferência? Em primeiro lugar, as manchas de luz no anteparo, uma de cada ramo, devem ser sobrepostas. Faça isto atuando nos suportes dos espelhos, sempre com muito cuidado e delicadeza. Tenha paciência! Após cada ajuste, afaste-se um pouco da mesa e espere 20 ou 30 segundos: lembre que as vibrações, por mais tênues que sejam, destruirão (momentaneamente) o padrão de interferência, portanto, não toque na mesa! Além disso, a massa de modelar pode estar se deformando elasticamente, o que também destruirá o padrão de interferência; bastará esperar um pouco e a deformação cessará. Se as franjas ainda assim não aparecerem, não desista, tente outra vez. Elas acabarão por "dar o ar da graça" e aí, acredite, você terá seu "momento de glória"!

Há dois detalhes que ajudarão bastante no sucesso da montagem. O primeiro deles refere-se às duas reflexões mais fortes que o feixe de luz que emana do laser sofre no divisor. Nos testes realizados, conseguimos observar as franjas tanto com um quanto com o outro feixe refletido. Porém, as franjas são muito mais nítidas com um deles. Não nos alongaremos aqui discorrendo sobre este efeito; é mais simples testar um, depois o outro e ficar com o que der melhores resultados.

O segundo detalhe diz respeito à polarização do feixe do laser de diodo. Quando o feixe de laser incide numa superfície plana, a região que ele ilumina assume a forma de uma elipse; o plano de polarização está contido justamente no eixo maior desta<sup>xxii</sup>. Observe que, ao girar o laser em torno do eixo que contém o feixe de luz, as duas manchas de luz originadas da reflexão no divisor ficam gradualmente mais fracas, até quase desaparecerem. Este efeito é uma manifestação da polarização por reflexão, regida pela chamada "lei de Brewster"<sup>xxiii</sup>. Nos testes por nós realizados verificamos que a posição do laser que gera franjas de interferência com melhor contraste é aquela na qual o eixo maior da elipse do feixe fica aproximadamente a 45° com a vertical.

Uma vez encontradas as franjas, faça a seguinte demonstração: tape com a mão (sem tocar no interferômetro), alternadamente, cada um dos dois feixes de luz que se refletem nos espelhos; com isto, uma das manchas de luz desaparece do anteparo e, com ela, as franjas de interferência. Não poderia ser de outra forma! É a interferência dos dois feixes que gera o padrão de claros e escuros ou, se preferirmos, na região escura diremos que "luz+luz = escuro"... Note também que, numa região onde há uma franja escura, teremos luz se taparmos um dos feixes, qualquer um deles. Com os dois sobrepostos, dá escuro... Surpreendente, não? Os estudantes vão adorar isto!

## V. Outras aplicações do interferômetro

Além da abordagem qualitativa do parágrafo anterior, o que mais se pode fazer com um interferômetro? Já fizemos alusão, no início deste trabalho, ao papel histórico do experimento de Michelson e Morley. Mas há mais! Podemos:

a) Detectar vibrações: bata na mesa ou pise com força próximo à mesa sobre a qual a montagem foi realizada e veja o padrão de interferência desaparecer. Não se preocupe, ao cabo de alguns segundos, cessada a vibração, as franjas voltam!

b) Medir pequenos deslocamentos: se um dos espelhos se move, as franjas “andam”, e a passagem de uma franja clara a uma escura e novamente clara implica num deslocamento do espelho de meio comprimento de onda ( $\lambda/2$ ). (É supérfluo insistir que, mesmo para um deslocamento muito pequeno - da ordem de 1/6 de micrometro - uma franja clara vira escura; basta então apenas aflorar com o dedo a parte de trás de um dos espelhos para observar o deslocamento das franjas. Mas, porquê a referência a  $\lambda/2$  no parágrafo anterior? Se for provocado um deslocamento  $\Delta x$  em um dos espelhos na direção do feixe, o padrão de interferência mudará. Se  $\Delta x$  for igual, por exemplo, a  $\lambda/4$ , a diferença de percurso da luz neste ramo, provocada por este deslocamento, será de  $2\lambda/4$  (o "2" corresponde ao caminho de ida e volta da luz) Note que a franja que era, digamos, clara, passa a ser escura nas condições descritas. Caso você queira desenvolver um projeto<sup>xxiv</sup> para medir o comprimento de onda da luz com o interferômetro aqui proposto, contate os autores por e-mail. Será necessário um investimento adicional em um relógio comparador, por volta de 250 reais, e algum trabalho de oficina.

c) Medir o índice de refração dos gases<sup>xxv</sup>: basta assoprar levemente num dos ramos do interferômetro: o hálito quente fará com que as franjas se movam! Esta idéia leva à possibilidade de medir o índice de refração do ar. Os autores podem fornecer por e-mail maiores detalhes sobre o aparato experimental que permite esta medida. Aqui, o investimento adicional, desta vez mais alto, fica por conta da bomba de vácuo. As bombas tipo sifão, acopladas a torneiras e usualmente empregadas nos laboratórios de química em procedimentos de filtragem, também servem, mas será necessário dispor de um medidor de vácuo, com escala de zero a uma atmosfera.

Há muitas outras aplicações espetaculares, tais como os interferômetros usados na tentativa de detecção de ondas gravitacionais<sup>xxvi</sup> ou as aplicações em Astrofísica. O leitor certamente se defrontará freqüentemente com interferômetros ao consultar revistas e textos de divulgação científica.

## VI. Conclusão

O contraste das franjas de interferência, obtido com a montagem acima descrita, é bastante bom, surpreendente até, se considerada a simplicidade e o baixo custo da montagem. Trata-se de um projeto que, pela sua simplicidade, pode ser desenvolvido pelos próprios estudantes, dentro do quadro de atividades ligadas, por exemplo, às feiras de ciências, ou então como complemento ao laboratório de física da escola. Finalmente, a oportunidade de discutir com os estudantes um pouco dos primórdios da física moderna também é uma vantagem a considerar.

---

## Notas

<sup>xxix</sup> Ver, por exemplo, BASSALO, José Maria Filardo. “*A crônica da óptica clássica (parte III: 1801 – 1908)*”. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, pg. 48 - 49, abril de 1989.

<sup>xx</sup> Para uma abordagem quantitativa, ver, por exemplo, TIPLER, Paul. “Física moderna”, Editora Livros Técnicos e Científicos (1981), páginas 3 a 7. Um texto excelente para um primeiro contato é o primeiro capítulo de GAMOW, George. “O Incrível Mundo da Física Moderna”: *Limite de velocidade na cidade*. São Paulo, Ibrasa, 1980.

<sup>xxi</sup> Um inconveniente destes lasers são as baterias, pequenas (tipo pilhas de relógio), cujo tempo de duração não excede em geral a uma hora. Medimos a corrente de alguns destes lasers, alimentados com as baterias originais, novas, e encontramos valores por volta de 40 mA. Num dos lasers substituímos as três baterias originais por três pilhas grandes, de lanterna, e a corrente medida ficou mais ou menos no mesmo patamar. Dois destes lasers, alimentados da forma descrita, funcionaram ininterruptamente por várias horas, sem qualquer problema.

<sup>xxii</sup> Há um excelente artigo sobre a polarização dos lasers de diodo: BENENSON, Raymond. “Ligth polarization experiments with a diode laser pointer”. *The physics teacher*, vol. 38, janeiro de 2000, pgs. 44-46. Uma solução de baixo custo para testar a polarização dos lasers de diodo consiste em usar uma lâmina polaróide retirada, por exemplo, de um visor de cristal líquido de uma calculadora fora de uso. Os autores podem fornecer por e-mail uma tradução livre deste texto, mediante solicitação dos interessados.

<sup>xxiii</sup> Além do artigo citado acima, veja, por exemplo, HALLIDAY, David, Robert RESNICK e JEARL WALKER, “Fundamentos de Física”, Editora Livros Técnicos e Científicos, 1996 - Volume 4 - secção 39-4: polarização por reflexão.

<sup>xxiv</sup> CATELLI, Francisco, Rodrigo BERNARDI e Marcos ANDREAZZA. “*Projeto de um deslocador de espelho para a medida do comprimento de onda da luz através de um interferômetro de Michelson*”. XIII SNEF – Simpósio Nacional de Ensino de Física, Brasília, de 25 a 29 de Janeiro, 1999.

<sup>xxv</sup> CATELLI, Francisco, Leandro PAVAN, Rodrigo BERNARDI “*Medida do índice de refração de um gás com laser de diodo*”. Apresentado no CRICTE 99, UFSM, em 9, 10 e 11 de julho, 1999.

<sup>xxvi</sup> O projeto franco italiano VIRGO inclui a construção de um gigantesco interferômetro do tipo Michelson, com braços de 3 km de comprimento, percorridos múltiplas vezes pela luz de um laser, com o objetivo de detectar ondas gravitacionais. Ver, por exemplo, o número especial de Science et Vie, no. 205, de dezembro de 1998, “*L’Univers de la Gravitation*”, em especial a página 205 e seguintes.