

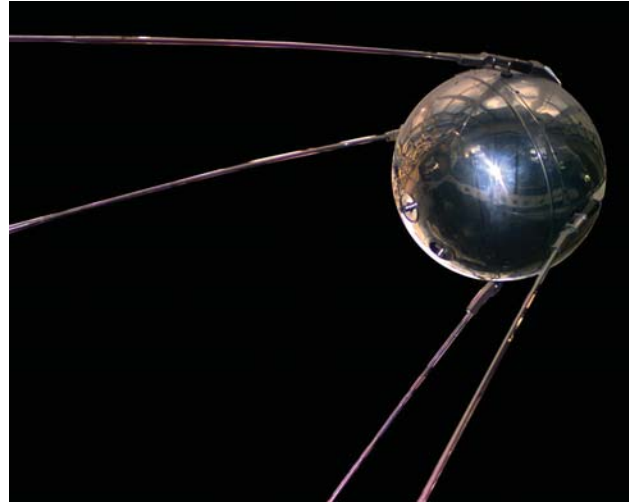
Carta do Editor

Recente levantamento do MCT¹ sobre percepção pública da ciência e tecnologia (C&T) mostra que o interesse do brasileiro por C&T (41%) encontra-se no mesmo nível que o interesse pelo esporte (47%) e, de modo presumível, muito acima daquele pela política (20%) Ótima notícia! No entanto, transparece um resultado preocupante, embora esperado. Entre os que disseram ter pouco ou nenhum interesse por C&T, a maioria justifica sua falta de interesse alegando que não entende dos assuntos. O resultado da pesquisa deixa muito claro o papel da alfabetização científica na escola. Para tornar cidadãos interessados em C&T, a conclusão óbvia é investir em uma educação científica radicalmente diferente da que é dada atualmente e que tenha início compulsoriamente nas primeiras séries do ensino fundamental. Um artigo recente da Science² resume resultados de estudos psicológicos que apontam para a infância as origens da resistência dos adultos à ciência. Um ensino sem criatividade e experimentação e essencialmente livresco não contribui para despertar o interesse da criança e do jovem pela ciência. Além disto, muitos professores de ciências também não entendem o que estão ensinando. Faltam-lhes conteúdos além dos problemas metodológicos. São questões cruciais que programas inovadores de melhoria do ensino de ciências devem tentar solucionar com urgência. Do contrário teremos no futuro que criar um Mobral³ em C&T.

* * *

Há 50 anos, em 4 de outubro, o Sputnik 1, uma minúscula “lua” de 55 cm pesando 83 kg, era lançada ao espaço. O primeiro satélite artificial da ex-URSS orbitou a Terra a uma altitude média de 600 km, período de

96 min e velocidade de 30.000 km/h. Emitiu sinais durante 21 dias. Em 3 de novembro, tendo como passageira a cachorrinha Laika, inaugurava-se o vôo espacial tripulado com o Sputnik 2 (meia tonelada). O monitoramento dos sinais vitais da cadela foi importante para previsões sobre uma possível missão tripulada humana. O sucesso soviético abalou a confiança dos americanos no que concerne a sua segurança e a sua ciência. Começou a corrida espacial e também um grande programa educacional reformista cujo objetivo era concentrar esforços na formação de cientistas e engenheiros através da melhoria do ensino de ciências e matemática. A concepção de Newton sobre satélites, dada nos *Principia*, relacionava a Lua com um projétil circundando a Terra sob ação da força gravitacional. Esta idéia apenas se consumou graças ao desenvolvimento de foguetes potentes. Nestes 50 anos, mais de 2200 satélites foram colocados em órbita da Terra. Sugiro que se use o cinquentenário do Sputnik como motivação para a abordagem na escola de vários conteúdos relativos ao tema. Seria oportuno estender a discussão do movimento balístico, em geral tratado no ensino médio, para o movimento de satélites naturais e artificiais. Projetos de fabricação e lançamento de foguetes de baixo custo (com garrafas PET) movidos a água ou álcool costumam atrair o interesse dos estudantes (competições podem ser promovidas). Poder-se-ia estimular uma abordagem contextualizada



O Sputnik 1.

envolvendo outros professores sobre as implicações geopolíticas deste evento (Guerra Fria, supremacia das superpotências) bem como o papel dos cientistas nos programas espaciais. Um fórum sobre o programa espacial brasileiro e uma análise dos subprodutos da corrida espacial para o desenvolvimento tecnológico (novos materiais, comunicações, GPS, etc) dariam um quê de atualidade ao projeto pedagógico. Enfim, muitas atividades podem ser promovidas a partir deste fato histórico fundamental para o progresso da C&T.

* * *

Agradeço ao leitor José Luis Maida que notou a ausência da solução dos problemas dos v. 3, n. 2 (2002) e v. 5, n. 1 (2004). A solução dos problemas do v. 3 está na página 48 desta edição.

* * *

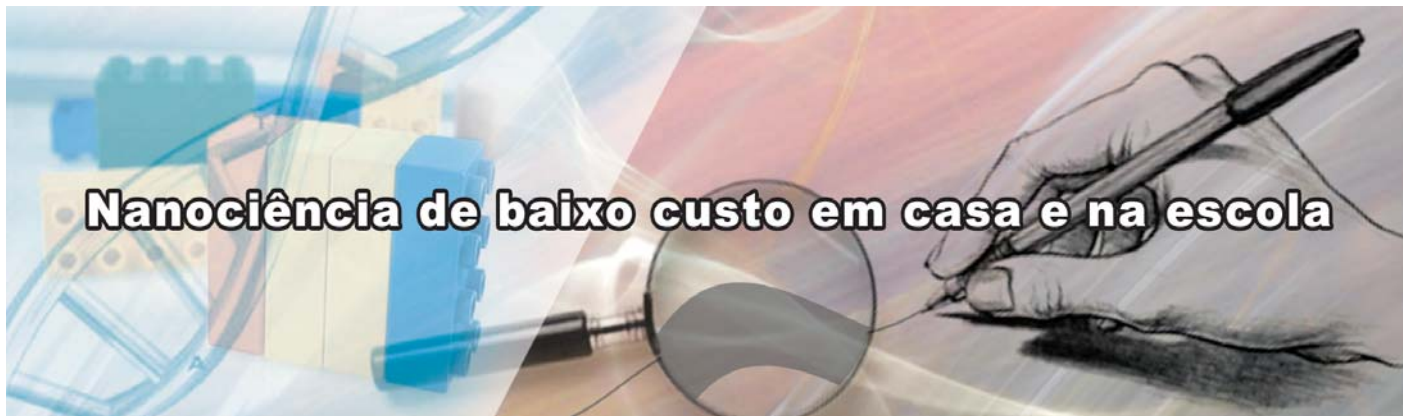
Vem aí o portal de divulgação científica da SBF. Aguarde.

Nelson Stuard

¹http://www.mct.gov.br/upd_blob/0013/13511.pdf.

²P. Bloom e D.S. Weisberg, *Science* **316**, 996 (2007).

³Para os mais jovens, o Mobral foi um programa de alfabetização de adultos do período autoritário.



Nanociência de baixo custo em casa e na escola

.....
Peter A.B. Schulz

Instituto de Física

Universidade Estadual de Campinas

Campinas, SP, Brasil

E-mail: pschulz@ifi.unicamp.br
.....

A percepção da nanociência é muitas vezes associada à imagem de que se trata de uma atividade humana desenvolvida em laboratórios demasiadamente sofisticados e caros. Associações desse tipo podem criar barreiras à predisposição de crianças, jovens e adultos leigos em se deixar instigar pelo tema, que pode ser considerado interessante em si, mas cuja compreensão mais aprofundada é socialmente relevante e constitui uma nova oportunidade para fortalecer o debate público de novas tecnologias. Avanços importantes vêm ocorrendo no cenário brasileiro de difusão pública da ciência nos últimos anos. No que se refere à nanociência, a “nanoaventura” [1] revelou-se uma experiência muito bem sucedida de aproximação de crianças e jovens à ciência e tecnologia em um ambiente especialmente desenhado para esse fim. Uma tarefa complementar importante é a atividade pós-visitação, tanto em sala de aula quanto em

casa ou em um outro ambiente de aprendizado não formal.

Uma discussão continuada com vários parceiros permitiu a formulação incipiente de um material didático de baixo custo para o ensino de conceitos de nanociência, aproximando o estudante das estratégias centrais desse ramo da ciência, bem como da própria percepção da escala de tamanho. É interessante observar que várias das

propostas apresentadas aparecem dispersas em diferentes contextos e fontes bibliográficas; no entanto, a reunião desse conjunto como um todo caracteriza-se como inédita. Outro aspecto importante refere-se à origem histórica muitas vezes longínqua dessas demonstrações, que passaram a formar um conjunto coeso de conceitos e técnicas com o *boom* de nanociência e nanotecnologia a partir do final do século XX.

Descendo até o nanômetro

Estamos acostumados a um enorme repertório de objetos e fenômenos que pertencem a uma escala de tamanho que também faz parte desse mesmo repertório. Facilmente estimamos a altura de uma pessoa e de um prédio

ou a espessura de um livro. No entanto, ao observar uma montanha já não temos tanta segurança se a dimensão é de algumas centenas ou mesmo poucos milhares de metros. Nesses casos, em geral, buscamos o

A percepção da nanociência é muitas vezes associada à imagem de que se trata de uma atividade humana desenvolvida em laboratórios demasiadamente sofisticados e caros. Associações desse tipo podem criar barreiras à predisposição de crianças, jovens e adultos leigos em se deixar instigar pelo tema

auxílio de guias que forneçam a informação: “a cachoeira tem 130 m de altura”. Para distâncias maiores, fenômenos aparentes bastante estranhos começam a povoar a imaginação das crianças (os adultos muitas vezes simplesmente não admitem, mas também pouco têm uma explicação clara para essas aparências): “papai, por que a Lua segue a gente quando andamos?” Um estranhamento às avessas

A nanotecnologia é sofisticada, mas a nanociência é também divertida e seus conceitos podem ser abordados na escola ou em casa com a ajuda de régua, bacias, palha de aço e jogos infantis.

acontece quando tentamos interagir com fenômenos e objetos cada vez menores. Admiramos os detalhes minúsculos de uma miniatura, mas quando os objetos fogem à percepção a olho nu, passamos inadvertidamente a um terreno de hipóteses e suposições muitas vezes amparadas por conceitos mais ou menos abstratos, melhor ou pior assimilados em aulas, palestras, leituras ou outros meios indiretos de contato com a realidade microscópica. Dificilmente temos a sorte de contar com um repertório de ferramentas para estimar as dimensões ou observar fenômenos de dimensões microscópicas. No entanto, a mesma criança que se maravilha com a Lua que acompanha seu passeio volta e meia pergunta de que são feitas as coisas e temos poucas respostas convincentes - porque sempre são abstratas - sobre a perda de uma propriedade física quando o pedacinho de um material é "pequeno demais". Pior ainda é conseguir mostrar que, se o "pedacinho é pequeno demais", novas propriedades podem surgir em vez de desaparecer.

Qual a largura de uma trilha de gravação em um disco de vinil? Para estimá-la, basta verificar o tempo de duração de uma faixa e medir sua espessura (em centímetros!). Conhecendo a rotação do disco, podemos calcular quantas trilhas foram percorridas...

Primeiro passo: a folha de papel e o disco de vinil

A primeira tarefa será encontrar estratégias para medir dimensões bem menores que, digamos, 1 mm, a menor divisão de uma régua comum. Devemos nos lembrar que nem todos os objetos poderão ser medidos, mas isso vale para as dimensões do nosso cotidiano: podemos usar uma régua para medir o comprimento do nosso pé, mas não do fêmur, já que não temos acesso direto a ele sem a ajuda de uma imagem de raios-X, por exemplo. A pergunta então é qual a espessura de uma folha de papel sulfite? Para medir a espessura de uma única folha precisaríamos de um instrumento bem mais preciso que uma régua (um micrômetro), mas podemos medir a altura de um pacote de 500 folhas com uma régua! São cerca de 5 cm, o que corresponde a 0,1 mm

(100 μm) para a espessura de uma folha. Trata-se evidentemente de uma estimativa.

Uma estratégia semelhante pode ser usada para estimar a largura de uma trilha de gravação em um disco de vinil.¹ Para isso, basta escolher uma faixa e verificar o tempo de duração da mesma. A medida a ser feita é com a régua: a espessura de uma faixa em centímetros. Com a duração da música e sabendo que a rotação do disco é de 33,3 rotações por minuto, sabemos quantas trilhas foram percorridas pela agulha e estimamos a largura de cada trilha.²

A ordem de grandeza encontrada nessas medidas é a mesma do diâmetro de um fio de cabelo (entre 50 μm e 100 μm) e dos jatos dos cartuchos de impressoras de jatos de tinta (50 μm) [2]. São dimensões cerca de 10 vezes menores que a menor divisão em uma régua. O próximo passo será uma redução ainda maior, em um fator de 100 vezes.

Rumo ao micrômetro e além: a gravação de um CD e a teia de aranha

Um antigo LP de vinil pode armazenar cerca de 30 min de música em uma área de 0,06 m². Os primeiros CDs de música podiam armazenar 60 min (o dobro) em uma área de 0,009 m², ou seja, cerca de 7 vezes menor. Isso levaria a pensar que as ranhuras de gravação em um CD teriam a largura de 2 a 3 micra, em vez dos mais de 30 micra em um LP de vinil. Essa largura no CD, é, no entanto, menor ainda, pois a gravação digital tem maior conteúdo sonoro que o possibilitado pela gravação analógica. Como podemos estimar a largura das trilhas de gravação em um CD? A ima-

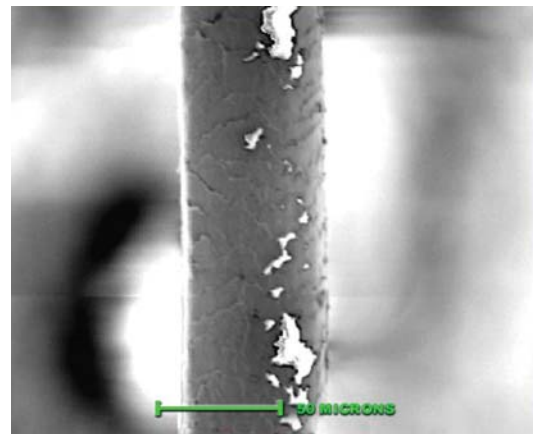


Figura 1. Qual é o diâmetro de um fio de cabelo? Imagens de microscopia interessantes como essa estão no sítio: <http://ion.asu.edu>.

gem de microscopia eletrônica na Fig. 2 traz a resposta (1 microm), mas não é uma resposta obtida com uma medida de baixo custo. Uma estimativa de baixo custo nesse caso pode ser feita a olho nu! Basta olhar para um CD (o lado gravado) refletindo uma fonte luminosa que observamos a decomposição da luz nas cores do arco-íris: o CD funciona como uma grade de difração para a luz visível [3], portanto suas trilhas de gravação têm que ter um espaçamento com dimensões da ordem do comprimento de onda da luz visível, ou seja, de 1 μm .

Comprimentos da ordem de 1 μm correspondem às dimensões de uma bactéria. Conseguir estimar dimensões menores significa finalmente fazer medidas no mundo nanométrico. Pelo menos uma estimativa nessa escala de tamanho pode ainda ser feita a olho nu:

O olho humano é capaz de detectar

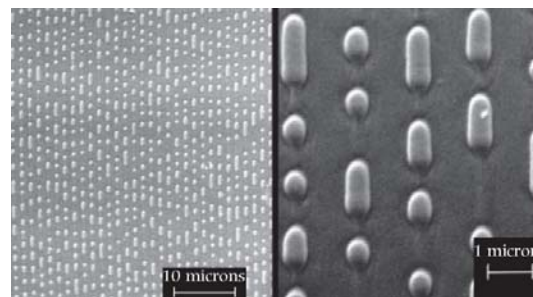


Figura 2. Gravações de dados em um CD fotografados por microscopia eletrônica. Fonte: http://www.emal.engin.umich.edu/courses/SEM_lectureCW/SEM_frontpage.htm1.



Figura 3. Teias de aranha: visíveis apenas por causa da reflexão da luz do sol.

objetos a uma distância de 10 cm com um diâmetro de 25 μm . O diâmetro médio de um fio de teia de aranha é de 0,15 μm (Fig. 3). O fio mais fino já medido tinha apenas 0,02 μm de espessura. Nós somos capazes de ver as teias apenas devido à reflexão da luz do sol nelas. Esses fios extremamente finos são capazes de deter uma mosca voando a toda velocidade. Esses fios não são apenas extremamente resistentes, mas também muito elásticos. [4]

Escala nanoscópica na ponta do lápis

Podemos realizar medidas, com a ajuda de uma régua, de dimensões menores que um micron, mas mais uma vez são procedimentos geométricos indiretos e extremamente simples. Notamos que a espessura finita de uma folha de papel, ou do diâmetro de um fio de cabelo, são perceptíveis ao tato, embora não tenhamos precisão suficiente para fazer estimativas numéricas com a ponta dos dedos. Ainda assim, o que pode ser percebido pelo tato representa um limite superior.³ Um traço leve feito por uma caneta ou lápis sobre uma folha de papel já não pode ser percebido pela sensibilidade tátil de um dedo humano. Esse fato sugere a possibilidade da espessura de uma palavra escrita sobre uma folha de papel ser de no máximo alguns micra. Uma estimativa para o caso da caneta já foi uma questão de física no vestibular nacional da Unicamp de 2005, que pode ser proposta como atividade em sala de aula:

Uma caneta esferográfica comum pode desenhar um traço contínuo de

3 km de comprimento. A largura desse traço é de 0,5 mm. Estime o volume em uma carga nova de uma caneta esferográfica e, a partir desse valor, calcule a espessura do traço deixado pela caneta sobre o papel.

A resposta é 0,2 μm [5]. É possível traçar linhas com uma lapiseira, medir o comprimento total dos traços, calcular o volume de grafite gasto (deixe, por exemplo, 1 mm para fora do corpo da lapiseira e desenhe até gastar tudo) e fazer o mesmo tipo de estimativa. No teste que eu fiz foi encontrado o incrível valor de 10 nm. Como a separação dos planos de átomos de carbono no grafite é de 0,34 nm, palavras escritas (de leve) têm a espessura de apenas 30 camadas atômicas. Isso é nanociência a um custo muito baixo.

Uma outra experiência interessante é calcular a espessura de um traço de grafite por meio da medida de sua resistência elétrica (Fig. 4), com o qual foi obtido o valor de 17 nm [6]. Uma estimativa geométrica feita em resposta a esse projeto encontra o valor de 4 nm [7]. Apesar das discrepâncias, todos os resultados estão na mesma ordem de grandeza e o leitor é convidado a fazer sua própria medida.

Fenômenos emergentes em dimensões decrescentes: acendendo aço com uma bateria

Aqui propomos então a pergunta inversa a que muitas vezes ouvimos de crianças. Essa curiosidade é, por exemplo, sobre quantas vezes podemos dividir um pedaço de madeira e os pedacinhos menores continuarem a ser madeira. Essa questão preocupa a humanidade desde, pelo menos, Demócrito (460–370 A.C.), o famoso atomista grego [8]. Tomemos um pedaço de ouro. Imaginamos que podemos dividi-lo em partes menores até chegarmos aos átomos de ouro isolados. Uma análise química ou física desses átomos mostrará que eles são ouro; afinal, o que mais poderiam ser?

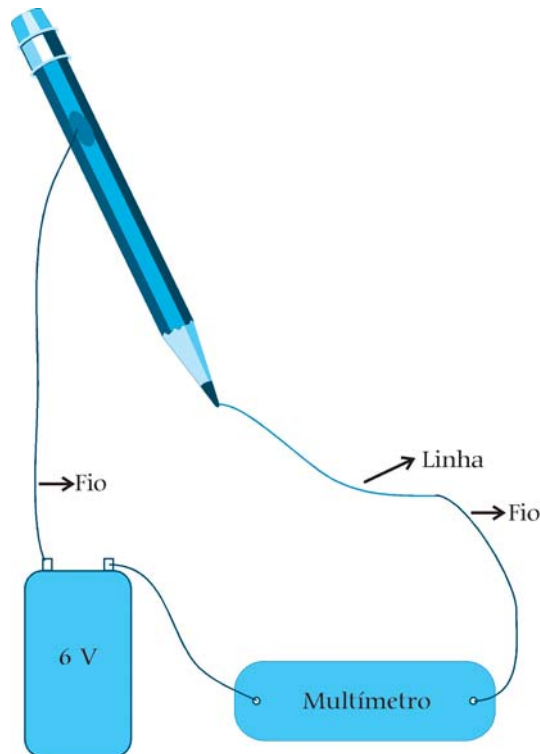


Figura 4. Experimento de resistência elétrica de uma linha desenhada a lápis.

A resposta está nas propriedades que associamos ao ouro, como a cor e o brilho. O que acontece com o “dourado” em pedaços cada vez menores de ouro? A resposta é que o dourado passa a ser vermelho rubi e a razão disso está em um efeito de tamanho sobre as propriedades ópticas desses pequenos pedaços de ouro (diâmetros menores de 40 nm) [9]. Resumindo: podemos revelar novas propriedades físicas e químicas em aglomerados muito pequenos de um determinado material, que não se manifestariam em aglomerados maiores. Essa é uma das estratégias importantes exploradas em nanotecnologia e um exemplo muito acessível, embora micro e não nano, é colocar fogo em aço com uma bateria (Fig. 5). Se encostarmos os pólos de uma bateria de 9 V (na verdade, duas pilhas de 1,5 V em série já são suficientes) em contato com uma chave de fenda, nada acontecerá (a não ser que a bateria será gasta rapidamente, pois o aço conduz eletricidade e o sistema estará em curto-circuito). Se encostarmos esses pólos em um chumaço de palha de aço, notaremos que a corrente elétrica esquenta os fios de aço, que se tornam



Figura 5. Um pedaço de palha de aço queimando devido à corrente elétrica gerada pela bateria.

incandescentes. Ao retirarmos a bateria, a palha continuará a queimar, ou seja, temos aço pegando fogo. O que acontece com a palha de aço é que a razão área/volume já é suficiente para manter o fogo, ou seja, os fios de aço são tão finos, que o número de átomos de ferro em contato com o oxigênio do ar é grande o suficiente para entrar em combustão com o aquecimento Joule proporcionado pela corrente provocado pela bateria.

Razão área/volume: acelerando reações químicas

A variação da razão área/volume crescente com a diminuição do tamanho dos corpos pode ser também imaginada com um “experimento geométrico”. Qual é o volume e a área em contato com o ar de um dado de 1 cm de aresta? Resposta: 1 cm³ e 6 cm², respectivamente. Agora podemos dividir esse dado em 1000 dados menores de 1 mm de aresta e fazer a mesma pergunta. Qual é a resposta? Novamente 1 cm³ para o volume, mas a área passa a ser de 60 cm². Imagine agora dividir o dado em 10¹⁵ pequenos dados de 100 nm de aresta. O volume total será sempre o mesmo, mas a área total em contato com o ar passará a ser de 60 m², que é comparável à área de um pára-quadras aberto. Esse contato maior é responsável pela aceleração das reações químicas, como na experiência da palha de aço. Uma outra experiência que ilustra esse fenômeno é bastante difundida e consiste em comparar o tempo que uma pastilha efervescente demora para se dissolver em compa-

ração com o tempo de dissolução dessa mesma pastilha moída. Sugestões de experiências desse tipo podem ser encontradas na internet, embora a grande maioria dos sítios estejam em inglês [10].

Candidatos a novas tecnologias: materiais e estratégias

Traços a lápis podem ser interessantes além de ser um exemplo de uma espessura na escala da nanociência. Já comentamos a possibilidade de

estimar a espessura de uma linha desenhada com um lápis por meio da resistividade elétrica do mesmo. Usar riscos a lápis sobre papel (ou outro tipo de suporte) como *kit* para experimentos de circuitos elétricos (resistores) e propriedades elétricas dos materiais são razoavelmente frequentes na literatura [11-13]. O grafite não é, obviamente, a forma alotrópica do carbono que aparece como material promissor, e sim o nanotubo de carbono⁴. No entanto, podemos pensar em experiências de propriedades elétricas de desenhos a lápis como analogias para dispositivos de micro(nano)eletrônica.

A estratégia do auto-arranjo

Para tornar uma nanofabricação possível em toda a sua potencialidade, um novo paradigma faz-se necessário: a auto fabricação do dispositivo. É a chamada estratégia *bottom-up*, na qual os minúsculos pedaços constituintes se auto-organizam no dispositivo. A organização desses pedaços por meio de um agente externo (como um microscópio de força atômica, por exemplo) seria muito lenta para os padrões de produção em série das tecnologias estabelecidas. Uma aposta fascinante é a auto-organização de moléculas de DNA, com sequências específicas para formar arranjos previamente projetados, por meio do mecanismo de emparelhamento de pares de base

[14] como na Fig. 6.

Auto-arranjos em nanoescala ocorrem em outros sistemas físicos, como os pontos quânticos auto-organizados, basicamente devido a tensões superficiais durante o processo de formação dessas estruturas [15].

Uma ilustração muito efetiva e divertida desse tipo de auto-arranjo é o que ocorre com blocos de plástico quadrados flutuando em uma superfície de água devido a tensões superficiais, que são minimizadas com a reorganização dos blocos. Essa demonstração pode ser feita com blocos de Lego ou similares. O uso do jogo Lego para demonstrações em nanociência foi desenvolvido pelo Interdisciplinary Education Group da Universidade de Wisconsin-Madison [16]. Desse conjunto de experimentos, o auto-arranjo foi testado pelo autor em uma bacia com água (Fig. 7).

Gota de óleo sobre água: dimensões moleculares

O exemplo anterior ilustra um auto-arranjo, mas é macroscópico. Colorido e divertido, mas muito longe do nosso objetivo de chegar à bilionésima parte do metro, que é o nosso tema. Um bom complemento seria provocar um auto-arranjo nessa escala e essa experiência pode ser feita

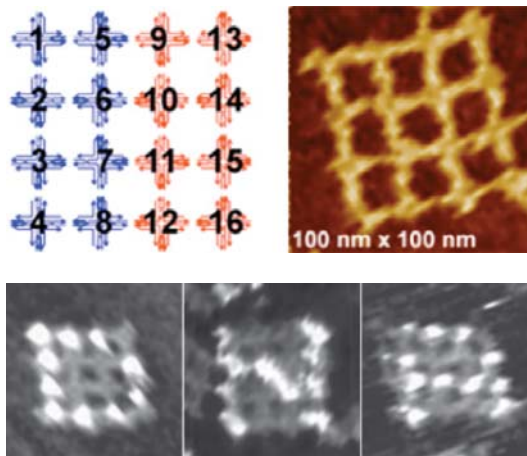


Figura 6. Auto-arranjo de moléculas de DNA formando um reticulado. Algumas moléculas são funcionalizadas com partículas metálicas e se auto-organizam formando as letras D, N e A. Resultados obtidos por um grupo de pesquisadores da Universidade de Duke nos EUA. Fonte: <http://www.physorg.com/news9322.html>.



Figura 7. Experimento de auto-arranjo com blocos de LEGO.

em casa ou na escola com a ajuda de uma bacia, uma gota de óleo de cozinha em um conta-gotas, um pouco de talco e uma régua (Fig. 8). Colocamos água em uma bacia e esperamos a formação de um espelho de água sem agitação. Polvilhamos então com cuidado a superfície com talco e esperamos que eventuais agitações na água terminem por completo. Em seguida pingamos uma gota de óleo sobre a água, bem no meio da bacia e com o conta-gotas bem perto da superfície. O que acontece? O óleo se espalha rapidamente sobre a superfície da água e isso pode ser visualizado pelo deslocamento das partículas de talco. Se pingarmos uma gota de óleo sobre um vidro ou uma placa de madeira não observamos esse deslocamento. O que acontece sobre a água é que as moléculas de óleo têm uma extremidade hidrofóbica (são repelidas pela água) e a outra hidrofílica (são atraídas pela água). O resultado é que essas moléculas se espa-

lham totalmente sobre a água, formando um filme fino com a espessura de uma única molécula de óleo, que só enxergamos indiretamente pelo movimento das partículas de talco. Essa espessura do filme fino de óleo sobre a água é verificado por uma comparação de volumes (estimativa do volume da gota saindo do conta-gotas comparado à área da mancha do talco deslocado multiplicado pela espessura dessa mancha) como fizemos para o risco à caneta ou lápis. Um pouco da história desse experimento curioso, feito já por Benjamin Franklin em 1774, pode ser lido no jornal do Centro de Biotecnologia Molecular e Estrutural [17].

A vitrola e o microscópio

Um programa de atividades em nanociência não estaria completo sem uma ligação ao ambiente mais sofisticado de realização das pesquisas de ponta e seus instrumentos. O paradigma da instrumentação científica em nanociência é, provavelmente, o conjunto dos novos microscópios de varredura de sonda (*scanning probe microscope*; existem várias versões



Figura 8. Partículas de talco deslocadas pela gota de óleo que se espalhou sobre a superfície da água. O diâmetro da área sem talco é de aproximadamente 20 cm. O diâmetro da gota de óleo era de 1 mm. Isso resulta em uma espessura da camada de 10 nm. Nada mal para uma tentativa improvisada rápida.

para a tradução para o português), surgidos na década de 1980 [18]. Os mais conhecidos são o microscópio de tunelamento e o de força atômica. Esses foram os primeiros instrumentos que permitiram não somente “ver” (as aspas aqui são fundamentais, como constataremos daqui a pouco) átomos, mas também manipulá-los individualmente de maneira controlada.

A microscopia de varredura de sonda (Fig. 9, direita) é constituída de três aspectos básicos que precisam ser acoplados. Primeiro a sonda em si, objeto que só pode ter uma resolução nanoscópica se também tiver dimensões nanoscópicas. Diferentes tipos de sonda são sensíveis a diferentes fenômenos físicos (corrente elétrica, forças atômicas ou propriedades magnéticas). Essas sondas precisam ser deslocadas sobre o objeto de estudo de forma controlada (a varredura) com precisão também da ordem de nanômetros ou mesmo de frações de nanômetro. Por último, a variação da medida do fenômeno físico em função da posição da sonda precisa ser traduzida em imagens adequadas do objeto estudado e manipulado em escala atômica. Por isso que “ver” átomos é um processo bastante complexo, indireto e, portanto, entre aspas.

Uma analogia útil para a microscopia por varredura de sonda, que envolve os três aspectos mencionados acima, é o familiar toca-discos, talvez melhor conhecido pelos mais jovens através do trabalho dos DJs (Fig. 9, esquerda). Nesse caso nunca existiu a motivação de “ver” os detalhes microscópicos da superfície do disco de vinil e sim “simplesmente” ouvir a

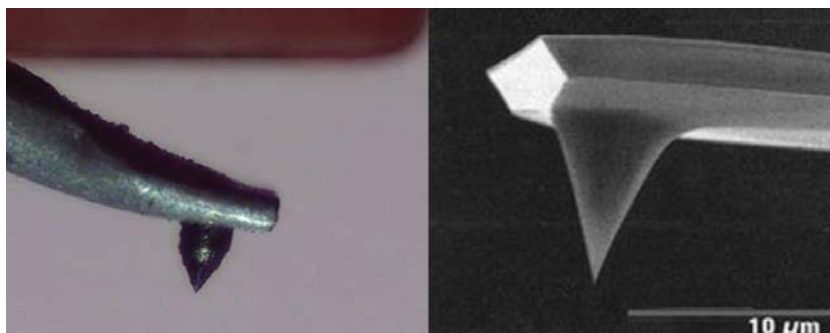


Figura 9. A agulha de um toca-discos (esquerda) e a ponta de um microscópio de força atômica (direita): quais são as semelhanças e quais as diferenças?

música. De fato, um grupo de pesquisadores da Universidade de Berkeley desenvolveu um procedimento de recuperação de discos antigos que demonstra esse princípio: nesse trabalho é feita uma leitura óptica (“ver”) dos sulcos, que depois é traduzida em uma gravação digital do registro musical, que assim é recuperado.⁴

Uma atividade interessante seria discutir as semelhanças e diferenças (limitações da analogia) entre um microscópio de força atômica (Atomic Force Microscope, AFM)⁵ e um toca-discos de vinil. Por exemplo, observem as duas fotos da Fig. 9: não existe uma diferença muito grande entre uma agulha de vitrola e a ponta de um AFM. No caso da agulha, a pressão dos sulcos produz um sinal elétrico na agulha, enquanto no AFM, o braço no qual a ponta está presa se desloca devido às forças de van der Waals entre os átomos em uma superfície e os poucos átomos na extremidade da ponta. Essas forças são da ordem de pico Newtons (1 pico = 1 trilionésimo)! O longo caminho entre o sinal elétrico gerado na agulha pelo sulco do disco e a música amplificada em “alta fidelidade” pode

ser comparável ao caminho entre esse deslocamento do braço da agulha, quer dizer da ponta do AFM, e a imagem de fato dos átomos sobre uma superfície.

Uma nova pergunta sobre o AFM seria: como o deslocamento do braço da ponta de um microscópio, devido às forças entre os átomos, é detectado para depois ser transformado em imagem? Esses movimentos da ponta de um AFM são detectados pelo deslocamento de um feixe de raio laser que é refletido pelas costas do braço que prende a ponta. Podemos testar esse princípio com o toca-discos, usando uma ponteira laser, conforme mostra a Fig. 10 (atenção: nunca olhe diretamente para o feixe de luz) presa a um suporte com o feixe direcionado à cápsula de um toca-discos com um pedaço de espelho. Colocando o disco para tocar, nota-se o feixe de luz refletido em um anteparo distante “dançando conforme a música”.

Comentários finais

Esse conjunto de atividades e



Figura 10. Toca-discos, uma ponteira laser e um pequeno espelho sobre a cápsula: o feixe refletido na parede vibra com o disco tocando, ilustrando opticamente a estrutura dos sulcos de gravação.

experimentos simples permite uma aproximação ao mundo da nanociência para estudantes do ensino médio. Essa aproximação pode ser feita tanto em sala de aula, em outro ambiente escolar ou mesmo em casa, desde que de maneira supervisionada. O conteúdo exposto aqui poderia ser discutido em 3 ou 4 aulas de 50 min. Espera-se que as referências indicadas possibilitem um aprofundamento adequado ao tema, bem como uma indicação de outras iniciativas desse tipo realizadas em outros países.

Referências

- [1] Veja o sítio www.nanoaventura.com.br para maiores informações e links para outras páginas interessantes sobre nanociência e nanotecnologia.
- [2] <http://www.hilord.com/InkJet.htm>.
- [3] Detalhes sobre esse efeito, bem como dicas para a construção de um espectrômetro caseiro podem ser encontrados em Marisa Almeida Cavalcante e Cristiane F.C. Tavoraro, *Física na Escola* **3**(2), 40 (2002).
- [4] http://www.geocities.com/~esabio/aranha/teia_e_a_seda.htm.
- [5] http://www.convest.unicamp.br/vest_anteriores/2005/download/comentadas/fisica.pdf.
- [6] Projeto de Alice Newcombe: <http://www.pencilpages.com/articles/thickness.doc>.
- [7] Stephen Ladyansky's folloup: <http://www.pencilpages.com/articles/index.htm>.
- [8] <http://www.pucsp.br/~filopuc/verbete/democri.htm>.
- [9] Peter A.B. Schulz, *Física na Escola* **6**(1), 58 (2005).

- [10] http://nanosense.org/activities/sizematers/properties/SM_Lesson3_Teacher.pdf.
- [11] Samuel Derman e Aron Goykadosh, *The Physics Teacher* **37**, 400 (1999).
- [12] Lawrence D. Woolf e Holger H. Streckert, *The Physics Teacher* **34**, 440 (1996).
- [13] Rick Marshall, *Physics Education* **Março**, 94 (2003).
- [14] <http://www.physorg.com/news9322.html>.
- [15] A.J. Chiquito, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 159 (2001).
- [16] <http://mrsec.wisc.edu/Edetc/LEGO/index.html>.
- [17] Carlos H.I. Ramos em <http://cbme.if.sc.usp.br/noticias/edicao9.pdf> e <http://cbme.if.sc.usp.br/noticias/edicao10.pdf>.
- [18] Veja uma série de imagens e atividades no sítio http://www.nobelprize.org/educational_games/physics/microscopes/scanning/.

Notas

¹Os mais jovens devem conhecer discos de vinil e os toca-discos pelo menos através dos DJs! Uma cronologia interessante da história da gravação musical pode ser en-

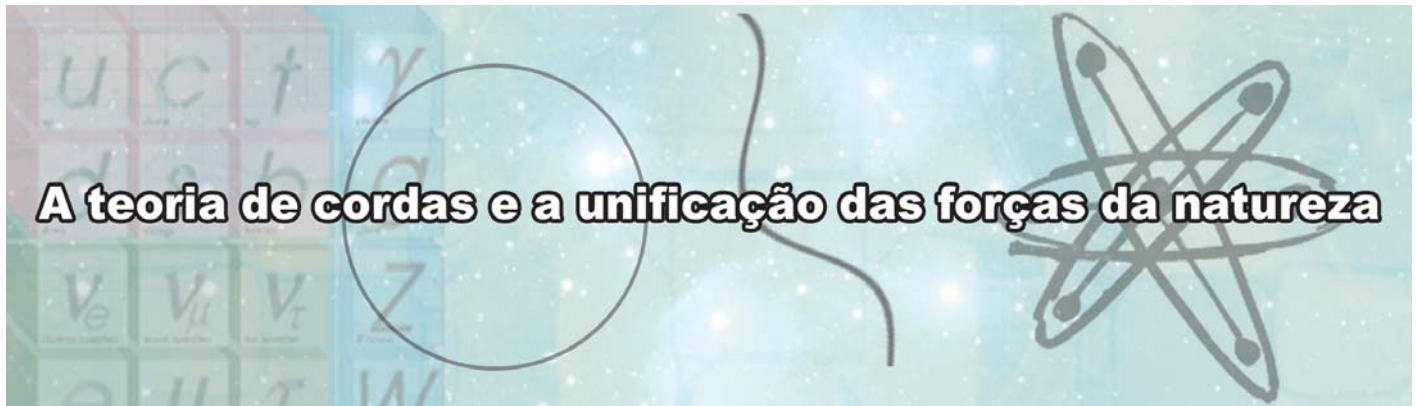
contrada no sítio <http://history.sandiego.edu/gen/recording/notes.html>.

²Eu escolhi um disco de vinil com a primeira faixa de 2 min e 20 s. A largura era de aproximadamente 9 mm. A estimativa para a largura da trilha é de 32 μ m. Ela é bastante próxima ao valor nominal que existe na literatura.

³Uma estimativa feita com um livro impresso em papel bíblia indica que uma folha desse papel tem uma espessura de aproximadamente 50 μ m. Seria interessante determinar o limite inferior de percepção para o tato, como no caso da visão, mencionado na discussão sobre o fio da teia de aranha.

⁴Isso já passou a ser questionável nos últimos meses, pois cresce a expectativa em torno do Grafeno (planos individuais de grafite) como um dos possíveis substitutos do silício para a eletrônica do futuro: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110060316>.

⁵Uma boa descrição do funcionamento de um AFM pode ser encontrada no sítio do Naval Research Laboratory: <http://www.stm2.nrl.navy.mil>.



A teoria de cordas e a unificação das forças da natureza

Victor O. Rivelles

Instituto de Física

Universidade de São Paulo

São Paulo, SP, Brasil

E-mail: rivelles@fma.if.usp.br

<http://fma.if.usp.br/~rivelles/>

Unificação

Se Newton vivesse em um país católico, certamente seria condenado a morrer na fogueira. No século XVII, corpos celestes, como a Lua e os planetas, pareciam comportar-se de forma bastante diferente dos corpos terrestres. Enquanto na superfície da Terra os corpos em movimento tendem a parar, os astros celestes estão em movimento incessante pelos céus. Afinal, como se acreditava na época, a Terra era o local dos pecadores e das coisas imperfeitas, enquanto o céu representava o paraíso e a perfeição. E os astros assim o demonstravam. Quando Newton descobriu que os corpos celestes e terrestres obedecem às mesmas leis do movimento, houve uma unificação na descrição desses fenômenos. Isso gerou uma revolução na ciência então incipiente. E se Newton não vivesse em um país protestante, certamente seria condenado à morte por aproximar o céu e a terra.

Outra grande unificação ocorreu no século XIX. Nossa experiência mostra que fenômenos elétricos são completamente

O conceito de unificação tem-se mostrado extremamente útil quando tentamos compreender a estrutura última da matéria

distintos dos fenômenos magnéticos. O comportamento de um pedaço de plástico eletricamente carregado é bastante diferente do comportamento de uma bússola. Ao escrever suas famosas equações para o eletromagnetismo, Maxwell mostrou que o campo elétrico e o campo magnético estão intimamente conectados e são diferentes manifestações de uma mes-

ma entidade, o campo eletromagnético. Além disso, com a descoberta de que a luz é uma onda eletromagnética, a óptica também passou a ser descrita pelas equações de Maxwell. Eletricidade, magnetismo e óptica foram unificadas na teoria eletromagnética de Maxwell.

Partículas elementares

Hoje em dia, o conceito de unificação tem-se mostrado extremamente útil quando tentamos compreender a estrutura última da matéria. Um grande caminho foi percorrido desde quando Demócrito propôs que tudo é composto de átomos. Sabemos que os átomos são compostos por um núcleo e por elétrons. Também sabemos que o núcleo é formado por prótons e nêutrons. Mais ainda, sabemos que os prótons e nêutrons são constituídos por quarks.

As partículas que não possuem estrutura interna e que não são compostas por outras mais elementares, são apresentadas na Fig. 1. Esses são os verdadeiros átomos indivisíveis, no sentido de Demócrito. O que é importante ressaltar é que as

partículas dessa tabela estão divididas em dois grupos distintos. Um deles é formado exclusivamente por férmions (partículas de spin $\frac{1}{2}$). São os quarks e léptons. Eles formam toda a matéria que conhecemos, como os elétrons, os neutrinos, os prótons (formados por dois quarks u e um quark d), os nêutrons (formados por um quark u e dois quarks d), e assim por diante.

A Natureza, em toda sua exuberância e complexidade, apresenta uma enorme variedade de fenômenos. Um dos principais objetivos da física é tentar compreendê-los da forma mais simples possível. Sempre que fenômenos diferentes conseguem ser descritos de uma maneira unificada, temos um salto qualitativo em nosso corpo de conhecimento. É isso que gera os grandes avanços na física. Hoje em dia, o conceito de unificação é essencial para a compreensão das partículas elementares e do próprio universo. E, como veremos, a teoria de cordas é a teoria unificada por excelência.

Partículas elementares

Quarks	u <small>up</small>	c <small>charm</small>	t <small>top</small>	γ <small>photon</small>
	d <small>down</small>	s <small>strange</small>	b <small>bottom</small>	g <small>gluon</small>
Léptons	ν_e <small>electron neutrino</small>	ν_μ <small>muon neutrino</small>	ν_τ <small>tau neutrino</small>	Z <small>Z boson</small>
	e <small>electron</small>	μ <small>muon</small>	τ <small>tau</small>	W <small>W boson</small>
I II III				
Três gerações de matéria				

"Carregadores" de força

Figura 1. Tabela das partículas elementares.

O outro grupo é formado por bósons (partículas de spin 1) e são conhecidos como bósons de calibre. Eles representam as partículas que transportam as forças de interação entre os quarks e léptons. Os elétrons, por exemplo, possuem carga elétrica e sofrem repulsão eletrostática. A partícula que transporta a força eletromagnética responsável pela repulsão entre os elétrons é o fóton. Os glúons, por sua vez, transportam um novo tipo de força entre os quarks, a força forte. Já os W e Z transportam a força fraca entre quarks e léptons.

Essas partículas que transportam as forças mostram que na Natureza existem três forças fundamentais. A força eletromagnética transportada pelos fótons, a força forte transportada pelos glúons e a força fraca transportada pelos W e Z. Qualquer outra força pode ser compreendida como uma combinação dessas forças fundamentais, à exceção da força gravitacional que é considerada em separado.

Apesar das forças forte e fraca serem menos conhecidas do que a força eletromagnética, elas são extremamente importantes. A força forte é a responsável pela estabilidade dos núcleos. Como em um núcleo existem prótons e nêutrons, os prótons sentem uma força de repulsão eletrostática por terem a mesma carga elétrica. É necessária uma força mais forte que a força eletromagnética para manter o núcleo coeso. Essa é a força forte. A força fraca, por sua vez, é responsável pelo decaimento beta do nêutron, um processo

que causa a transmutação dos elementos químicos.

Para descrever o comportamento dessas partículas e de suas interações, foi construída uma teoria ao longo dos anos 60 e 70. Tal teoria é denominada modelo padrão das partículas elementares. Nela, as forças eletromagnética e fraca são unificadas na chamada força eletro-fraca. A força forte permanece separada das outras duas. O modelo padrão é então uma teoria parcialmente unificada. Ele é extremamente bem sucedido em explicar o comportamento das partículas elementares. Testes do modelo padrão podem ser feitos com uma precisão impressionante. É uma das teorias mais bem verificadas da física. Os grandes aceleradores de partículas elementares produzem colisões entre elétrons, pósitrons (a antipartícula do elétron), prótons, antiprótons, etc, e estudando o resultado desses choques de altíssimas energias pode-se investigar em detalhe o modelo padrão. Atualmente, o maior acelerador em operação é o Tevatron, localizado nos Estados Unidos. Está em construção, na Suíça, o *Large Hadron Collider* (LHC), o grande colisor de hádrons, que deverá iniciar suas operações no final de 2007. Sua inauguração é aguardada ansiosamente, pois ele certamente fornecerá informações valiosas para compreendermos melhor o modelo padrão e descobriremos se ele requer modificações.

Apesar do sucesso do modelo padrão, existem vários indícios de que ele não representa toda a verdade sobre as partículas elementares. Por exemplo, foi descoberto recentemente que os neutrinos possuem uma massa muito pequena. No modelo padrão, entretanto, assume-se que os neutrinos não possuem massa. Quando olhamos detalhadamente a Fig. 1, temos, provavelmente, o mesmo sentimento que os físicos e químicos do final do século XIX tinham quando contemplavam a tabela periódica dos elementos químicos. As regularidades e diferenças

entre os vários elementos só encontraram uma explicação com o advento da mecânica quântica. O mesmo deve acontecer com a tabela das partículas elementares conhecidas atualmente. O modelo padrão é incapaz de explicar a estrutura dessa tabela e uma teoria mais geral se faz necessária. Existem também várias outras evidências de que é necessário estender o modelo padrão.

Uma possibilidade bastante natural seria unificar as forças eletro-fraca com as forças fortes. Isso foi feito na década de 80, e as teorias resultantes são genericamente conhecidas como teorias de grande unificação. Uma previsão comum a elas é que o próton deve ser instável, com uma vida média bastante elevada. Experiências foram

montadas para se observar o decaimento do próton, porém nada foi detectado. Tais modelos tiveram então que ser abandonados. Hoje em dia, entretanto, a grande motivação para a extensão do modelo padrão não está

A força forte é a responsável pela estabilidade dos núcleos, já que os prótons tendem a se repelir devido à força eletromagnética. A força fraca é responsável pelo decaimento beta do nêutron, um processo que causa a transmutação dos elementos químicos

vindo dos aceleradores de partículas, mas da cosmologia.

Cosmologia

É impressionante o que sabemos sobre o nosso universo. Ele foi criado há cerca de 13,7 bilhões de anos em uma grande explosão conhecida como big bang. Temos uma descrição bastante precisa da evolução do universo fornecida pela teoria cosmológica baseada na relatividade geral. Apesar do grande sucesso da teoria cosmológica ao explicar a formação dos elementos no universo primordial, a formação das galáxias, a radiação cósmica de fundo e vários outros fenômenos cosmológicos, ela não permite compreender o que aconteceu perto do instante inicial, quando ocorreu o big bang. Isso significa que se existia algo antes do big bang não temos como obter essa informação. A razão para isso é que logo após o big bang, nos instantes iniciais do universo, a energia era tão grande que todas as forças

devem ser tratadas quanticamente, inclusive a força gravitacional.

Ocorre que a gravitação, descrita pela relatividade geral, não pode ser quantizada. Isso acontece porque em algumas teorias as flutuações quânticas tornam-se infinitas e não podem ser tratadas por nenhum método matemático convencional e, portanto, essas flutuações fogem de nosso controle. Teorias em que isto acontece são chamadas de teorias não-renormalizáveis, isto é, não são passíveis de ser quantizadas. Esse é um fato impressionante. Duas das maiores teorias da física do século XX, a mecânica quântica e a relatividade geral, são incompatíveis entre si. Podemos estudar os efeitos da gravitação a longas distâncias, onde os efeitos quânticos são desprezíveis. Também podemos compreender os processos quânticos desprezando-se a força gravitacional, já que ela é muito fraca. Porém, se quisermos estudar os efeitos de uma teoria de gravitação quântica, não há como fazê-lo. Não existe uma teoria de gravitação quântica baseada na relatividade geral.

Esse conflito foi bem caracterizado a partir da década de 50, e muitos físicos famosos trabalharam nesse problema. Modifica-se ou a mecânica quântica ou a relatividade geral. Não há saída. Como veremos, a teoria de cordas apresenta uma solução para esse dilema. Uma saída surpreendente.

Apesar da inexistência de uma teoria de gravitação quântica antes do advento da teoria de cordas, foi cunhado um nome para o *quantum* do campo gravitacional; a partícula responsável por essa interação foi batizada de gráviton. Diferentemente dos outros bósons de calibre, o gráviton possui spin 2. A busca de uma teoria de gravitação quântica deve resultar em uma teoria que seja capaz de descrever os grávitons e sua interação com as outras partículas elementares.

Devido ao fato de não existir uma gravitação quântica com base na relatividade geral, a força gravitacional não pode ser incorporada ao modelo padrão, onde as outras três forças são tratadas quanticamente. Esse é um outro grande motivo que nos leva a crer que é necessário modificar o modelo

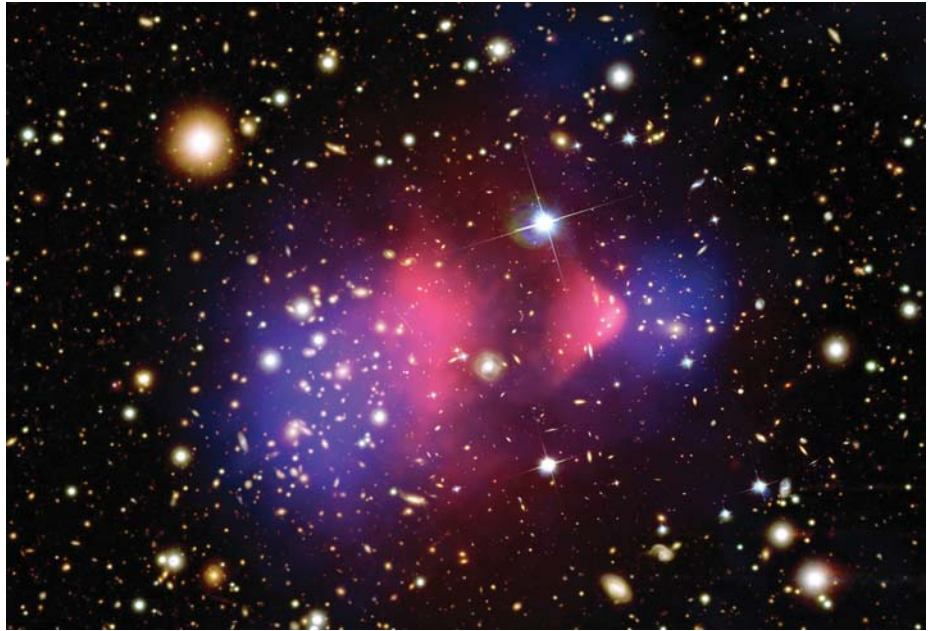


Figura 2. A colisão de dois aglomerados de galáxias revela a matéria escura. A região colorizada em vermelho representa o gás das galáxias emitindo raio-X e a região em azul representa a matéria escura. Fonte: <http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/>.

padrão; temos que incorporar a força gravitacional na descrição quântica de forma consistente.

Quando se pensava que sabíamos tudo...

No final do milênio, quando se acreditava que conhecíamos todos os constituintes básicos da natureza, nosso quadro mudou radicalmente. Satélites que foram lançados para buscar informações sobre a radiação cósmica de fundo mostraram que as partículas da Fig. 1 representam muito pouco daquilo que existe na natureza. Na verdade, elas representam apenas 4% do conteúdo do nosso universo.

Já há vários anos sabia-se que as galáxias possuíam muito mais massa do que aquela que era vista através dos telescópios. Aglomerados de galáxias e estrelas na borda das galáxias tinham um comportamento estranho. O movimento desses objetos, que é de origem puramente gravitacional, só pode ser explicado se assumirmos que as

galáxias possuem uma massa muito maior do que aquela medida através da luz que elas emitem. Essa massa extra é composta por algum tipo de matéria que não absorve e nem emite luz. Ela não interage com o campo eletromagnético e só pode ser detectada através de seus efeitos gravitacionais. É chamada, de forma bastante apropriada, de matéria escura (ver Fig. 2). Os dados cosmológicos indicam que ela representa 22% do conteúdo do universo. Hoje em dia, há vários experimentos tentando detectar a matéria escura presente na Terra e nas suas vizinhanças. São detectores extremamente

sensíveis colocados em minas bastante profundas. Até agora, nenhum desses experimentos teve sucesso. Entretanto, os efeitos da matéria escura continuam sendo encontrados através de medidas astronômicas cada vez mais precisas.

E os 74% restantes? Não são compostos nem de

matéria comum e nem de matéria escura. Estão na forma de energia

Podemos estudar os efeitos da gravitação a longas distâncias, onde os efeitos quânticos são desprezíveis. Podemos compreender processos quânticos desprezando-se a força gravitacional, pois ela é muito fraca. Porém, se quisermos estudar os efeitos de uma teoria de gravitação quântica, não há como fazê-lo. A teoria de cordas apresenta uma solução para esse dilema

escura, um tipo de energia que faz o universo expandir-se de forma acelerada. Sabemos que o big bang gerou a expansão do universo, e essa expansão é detectada na forma de um deslocamento para o vermelho das linhas espectrais das galáxias mais distantes. No final do milênio, descobriu-se que tais galáxias estão em expansão acelerada, algo não esperado pela cosmologia padrão.

Para explicar essa aceleração, é necessária uma forma de energia que produza uma pressão negativa. Uma forma de incorporar esse efeito na relatividade geral é acrescentar a famosa constante cosmológica nas equações de Einstein. Na época em que Einstein propôs sua teoria da relatividade geral, acreditava-se que o universo fosse quase estático. Entretanto, a relatividade geral previa que o universo estaria em expansão. Para corrigir isso, Einstein inseriu uma constante cosmológica na relatividade geral. Ela contrabalançava a expansão do universo com uma desaceleração, de forma que a relatividade geral pudesse gerar soluções estáticas. Depois de alguns anos, quando foi descoberto que o universo estava em expansão, Einstein rapidamente eliminou a constante cosmológica de suas equações e afirmou que ela constituía o maior erro de sua vida. Talvez Einstein não estivesse tão errado assim. Talvez a energia escura tenha sua origem em uma constante cosmológica como indicam resultados recentes de análise de galáxias distantes.

Se quisermos usar essa explicação para a energia escura, vamos encontrar algo surpreendente. Os dados cosmológicos mostram que a constante cosmológica deve ser muito pequena. Em unidades de massa de Planck, $m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$ (onde \hbar é a constante de Planck, c a velocidade da luz e G a constante da gravitação Newtoniana), seu valor é de aproximadamente $10^{-120} m_p^4$. Por outro lado, a constante cosmológica está associada às flutuações quânticas do vácuo, que usualmente são desprezadas na teoria quântica de campos, o tipo de teoria que descreve o modelo padrão. Tais flutuações são ignoradas porque os efeitos gravitacionais são muito pequenos. Se fossem

levados em conta, o valor da constante cosmológica deveria ser de $1 m_p^4$, isto é, um erro de 120 ordens de grandeza. Mais um exemplo de como a gravitação e a mecânica quântica não conseguem andar juntas. Essa discrepância é conhecida como o problema da constante cosmológica, talvez a maior discrepância já encontrada em toda história da física.

Existem outros problemas, de caráter mais técnico, que também não encontram solução dentro do modelo padrão. Um deles é o motivo pelo qual existe mais matéria do que antimatéria no universo. Se nada existia antes dele, o big bang deve ter criado uma quantidade igual de matéria e antimatéria. O que se esperaria é que à medida que o universo fosse se expandindo a matéria e a antimatéria iriam se aniquilar mutuamente, deixando um universo apenas com radiação e sem nenhuma matéria ou antimatéria. Sabemos que as interações fracas violam essa simetria entre matéria e antimatéria, e que alguns processos podem gerar mais matéria ou mais antimatéria. Se esse processo conhecido das interações fracas for utilizado, podemos prever a quantidade de matéria que restaria depois da aniquilação. Estima-se que no nosso universo visível deveríamos ter matéria equivalente a apenas uma galáxia! Novamente, outra flagrante contradição com a natureza quando gravitação e mecânica quântica estão presentes simultaneamente.

Teoria de cordas

Há, portanto, um consenso geral de que o modelo padrão deva ser estendido e que a força gravitacional deva ser incluída no nível quântico. Várias propostas foram feitas ao longo dos anos mas a única que sobrevive até hoje é a teoria de cordas.

Trata-se da extensão mais conservadora possível. Nela, a relatividade especial e a mecânica quântica não são modificadas. Afinal, não há nenhum indício de que estas duas teorias devam ser reformuladas. O que há de novo é que ao invés de considerarmos os obje-

tos fundamentais como sendo pontuais, como é feito com os quarks ou os fótons no modelo padrão, assumimos, ao invés disso, que os objetos básicos são estendidos. Podem ser cordas, membranas ou superfícies de dimensões maiores. Historicamente, a teoria foi descoberta como uma teoria de cordas, objetos estendidos unidimensionais, mas, hoje em dia, membranas e outros objetos extensos foram incorporados à teoria de cordas. Por razões históricas, o mesmo nome foi mantido.

A quantização da corda permite associar seus modos de vibração quantizados às partículas conhecidas (Fig. 3). Uma corda aberta vibrando no estado de energia mais baixa

Há um consenso geral de que o modelo padrão deva ser estendido e que a força gravitacional deva ser incluída no nível quântico

podem descrever um fóton ou um dos bósons de calibre do modelo padrão. Se for uma corda fechada, pode descrever um gráviton (Fig. 4). As cordas podem interagir entre si. Existe um processo de cálculo análogo ao dos diagramas de Feynman das teorias de campo convencionais, onde amplitudes de espalhamento podem ser obtidas. Com isso, podemos calcular o espalhamento de grávitons, algo impossível na relatividade geral. Obtemos, portanto, uma teoria quântica da gravitação. Esse é o maior sucesso da teoria de cordas, pois não há nenhuma outra teoria que permita realizar esses cálculos. Infelizmente, não é possível montar uma experiência que confirme essa previsão da teoria de cordas. O espalhamento de grávitons só pode ser detectado em energias extremamente altas e não há nenhum acelerador de partículas em funcionamento ou projetado que atinja essas energias. Nem em um futuro próximo seria possível construí-lo. Portanto, não é possível verificar experimentalmente a teoria de cordas dessa



Figura 3. As partículas elementares correspondem a modos de vibração de cordas.

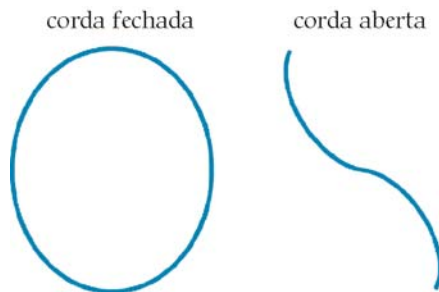


Figura 4. Cordas abertas e cordas fechadas.

maneira.

Supersimetria

Um outro fato surpreendente é que a teoria de cordas requer a existência de outras simetrias na Natureza, além daquelas do modelo padrão. Uma delas é a supersimetria, uma simetria entre bósons e férmions. Ela prevê a existência de um companheiro supersimétrico para toda partícula elementar. Como exemplo, o companheiro supersimétrico do elétron é chamado de selétron, e possui todas as características do elétron, exceto seu spin, que agora é zero. Já o companheiro supersimétrico do fóton é o fotino, e possui spin $\frac{1}{2}$. Existem experimentos montados no LHC para detectar partículas supersimétricas e nos próximos anos teremos dados experimentais a nos revelar se partículas supersimétricas existem ou não.

Infelizmente a teoria de cordas não está suficientemente desenvolvida para prever que tipo de supersimetria deve existir em quatro dimensões. Devido à existência de outros modelos supersimétricos, que não correspondem a nenhuma teoria de cordas, a descoberta da supersimetria não confirmará a teoria de cordas; apenas fornecerá uma evidência bastante forte de que ela encontra-se no caminho certo.

A supersimetria também deu origem ao nome supercordas. Quando se fala em teoria de cordas, na verdade quer-se dizer teoria de supercordas, já que a supersimetria é um ingrediente essencial na construção da teoria. Por isso, ambos os nomes são utilizados para se designar a mesma teoria.

Dimensões extras

Uma outra consequência bastante notável da teoria de cordas é que ela só pode existir em dez dimensões. Ela prevê

a existência de seis dimensões extras, além das quatro que vivenciamos. Note que as quatro dimensões que conhecemos referem-se às três dimensões espaciais mais uma dimensão temporal.

Estamos tão acostumados em nosso dia a dia com as três dimensões espaciais que nunca foi questionada a existência de outras dimensões. Inicialmente, muita gente zombava da teoria de cordas devido a esse resultado. Mas aos poucos se começou a perceber que de fato o número de dimensões em que vivemos deve ser questionado de maneira científica. Afinal, se queremos saber em quantas dimensões vivemos, devemos fazer uma experiência para determiná-las.

A teoria de cordas requer a existência de outras simetrias na Natureza, além daquelas do modelo padrão. Uma delas é a supersimetria, que prevê a existência de um companheiro supersimétrico para toda partícula elementar

A lei da gravitação universal de Newton prevê que a força de atração entre duas massas diminui com o inverso do quadrado da distância. Porém, isso é válido se existirem três dimensões espaciais. Se o número de dimensões espaciais for d então a lei da gravitação é modificada e a força comporta-se como $1/r^{d-1}$. Portanto, basta fazer experiências de balança de torção, como a de Cavendish, para determinar o número de dimensões. A lei de Newton foi testada na Terra e no sistema solar e mostra-se que $d = 3$. Entretanto, por mais incrível que pareça, ela nunca foi testada em distâncias submilimétricas. A pequenas distâncias, as forças eletromagnéticas atrapalham a detecção da força gravitacional porque esta última é extremamente fraca. A força de van der Waals, por exemplo, apesar de pequena, é de várias ordens de grandeza superior à força gravitacional e mascara os efeitos gravitacionais. Hoje em dia estão sendo feitos experimentos de balança de torção extremamente sofisticados para isolar apenas o efeito gravitacional e descobrir se existe algum desvio da lei Newtoniana. Por enquanto, nenhuma anormalidade foi encontrada.

Outra maneira de se detectar dimensões extras é através da colisão de partículas elementares. É possível que no LHC algumas partículas fujam

para essas dimensões extras, o que daria a impressão de que em quatro dimensões a lei da conservação da energia foi violada. O LHC está preparado para detectar eventos desse tipo e descobrir as dimensões extras.

Branas

Como a teoria de cordas também envolve outros objetos extensos, podemos considerar membranas ou, em geral, hipersuperfícies espaciais de p dimensões imersas no espaço-tempo de dez dimensões. Tais objetos são genericamente chamados de p -branas. Uma corda seria uma 1-brana enquanto uma membrana seria uma 2-brana, por exemplo (Fig. 5)

Isso significa que talvez nosso universo quadrimensional possa ser um 3-brana dentro do universo em dez dimensões da teoria de cordas. Tais modelos cosmológicos são conhecidos como modelo de branas. Eles fornecem uma descrição alternativa para o big bang. Podemos imaginar uma situação em que alguma outra p -brana colide com a 3-brana que constitui nosso universo. Essa colisão produziria muitos dos efeitos que são atribuídos ao big bang.

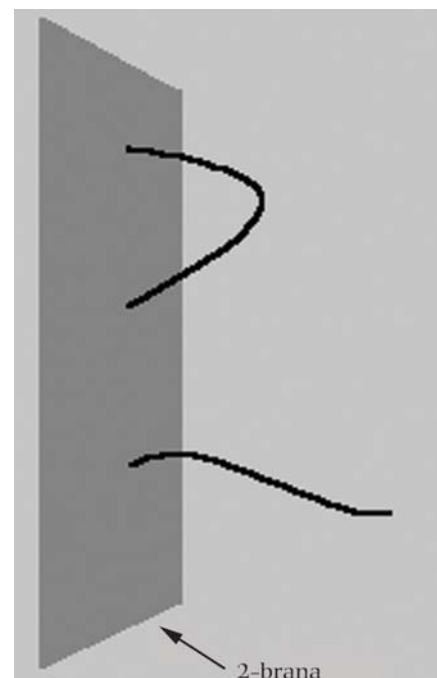


Figura 5. Uma 2-brana com cordas.

A cosmologia das branas é uma área bastante fértil. O fato de a força gravitacional ser tão fraca quando comparada às outras forças da natureza talvez tenha sua explicação no fato de vivermos em uma 3-brana. Nesse caso, as outras forças fundamentais, a eletromagnética, a fraca e a forte, estariam confinadas à 3-brana e não poderiam afetar qualquer coisa fora de nossa brana. Por

Cinco(!) teorias de cordas descobertas nos anos 80 inicialmente desencorajaram os físicos. Mas aos poucos foram sendo descobertas relações entre essas teorias, e nos anos 90 sabia-se que todas elas eram conectadas entre si por dualidades

outro lado, a teoria de cordas permite que a gravitação saia da nossa brana e afete o que está fora dela. Isso implicaria que a força gravitacional sentida na brana seria muito mais fraca que as outras forças. É uma possibilidade muito interessante.

A entropia de buracos negros

Um outro sucesso da teoria de cordas tem a ver com a entropia de buracos negros. Já há vários anos, sabe-se que os buracos negros podem ser tratados do ponto de vista termodinâmico. Isso significa que eles possuem atributos como temperatura e entropia. Pode-se mostrar que a entropia de um buraco negro é proporcional à sua área. Isto é surpreendente, pois sendo a entropia uma grandeza extensiva, deveria ser proporcional ao volume do buraco negro, e não à sua área. Tal resultado é tão surpreendente que levou físicos famosos a proporem um novo princípio que justificasse esse resultado. É o chamado princípio holográfico. Ele afirma que em um sistema gravitacional como um buraco negro, toda informação contida em seu interior estaria codificada em sua superfície, de maneira análoga a um holograma que contém em sua superfície a informação tridimensional do objeto que foi holografado.

A única maneira de verificar se a entropia é realmente proporcional à área é tratar o buraco negro quanticamente e calcular sua entropia contando-se o número de estados disponíveis no buraco negro. Para isso, é necessário uma teoria quântica da gravitação. A teoria de cordas permite mapear um

buraco negro, que possui um campo gravitacional forte nas suas vizinhanças, em uma determinada p -brana que está fracamente acoplada. Dessa forma, é possível computar o número de estados da p -brana e por conseguinte a entropia do buraco negro. O resultado desse cálculo é que ele confirma que a entropia é proporcional à área. Sem dúvida um grande sucesso para a teoria de cordas.

Dualidade

Na década de 80 foram descobertas cinco teorias de cordas diferentes. Isso foi algo desencorajador, pois se a teoria de cordas é a teoria unificada que descreve o universo, ela deveria ser única. Aos poucos, foram sendo descobertas relações entre essas cinco teorias. Em meados da década de 90, o quadro estava mais claro: todas as cinco teorias estavam conectadas entre si através de dualidades (Fig. 6).

A dualidade é um conceito derivado do fato que um dado sistema físico poder ser descrito de diversas maneiras. Sob certas condições, podemos usar um determinado conjunto de variáveis para descrevê-lo. Noutro regime, outro conjunto de variáveis pode ser mais conveniente. Um exemplo típico é a mecânica quântica. Em determinadas condições, um elétron pode ser descrito como uma partícula e noutras é melhor descrevê-lo como uma onda. Essa é a famosa dualidade onda-partícula da mecânica quântica.

O que se descobriu na década de 90 é que existe apenas uma única teoria, batizada de teoria-M, que pode ser

descrita pelas cinco teorias de cordas em dez dimensões então conhecidas, ou por uma teoria em 11 dimensões. Todas essas teorias são duais entre si e descrevem o mesmo objeto, a teoria-M. Como foi possível incorporar uma teoria em 11 dimensões, isso indica que

o conceito de dimensionalidade do espaço-tempo não é absoluto. Ele depende das variáveis escolhidas para descrever o sistema. Às vezes é melhor descrevê-lo como uma teoria em dez dimensões e outras vezes a melhor descrição é em onze dimensões.

A teoria-M ainda não está completamente formulada. Sabemos apenas os limites em que ela reduz-se à teoria de cordas em 10 dimensões ou à teoria em 11 dimensões. As branas possuem um papel essencial tanto na teoria-M quanto nas dualidades. A construção dessa teoria é um dos grandes desafios atuais.

Correspondência entre gravitação e teorias de calibre

Uma descoberta extremamente interessante ocorreu na década de 90. O conceito de dualidade entre cordas levou à conclusão que existe uma relação muito íntima entre teorias de gravitação e teorias de calibre, as teorias que descrevem os bósons de calibre. Essas duas teorias descrevem forças completamente diferentes, como a força gravitacional e a força eletromagnética, por exemplo. Em geral, essas teorias são estudadas no regime perturbativo, isto é, quando é possível encontrar um parâmetro pequeno e aplicar a teoria de perturbações fazendo-se expansões nesse parâmetro. Quando o parâmetro é grande, diz-se que se está no regime não-perturbativo. Em tal regime, obter informações sobre a teoria é muito difícil, já que não é possível utilizar técnicas perturbativas.

O que foi descoberto é que existe uma dualidade entre teorias de gravitação e teorias de calibre, mas a dualidade é tal que relaciona uma teoria no regime perturbativo com a outra no regime

não-perturbativo. Com isso, podemos estudar o regime não-perturbativo das teorias de calibre, um sonho dos que trabalham nessa área, utilizando uma teoria gravitacional perturbativa.

A relação mais famosa é a correspondência AdS/CFT que trata de uma

O modelo de branas fornece uma descrição alternativa para o big bang: uma p -brana colide com uma 3-brana que constitui nosso universo. Essa colisão produziria muitos dos efeitos que são atribuídos ao big bang

teoria gravitacional em um espaço de anti-de Sitter (AdS), que é um espaço com curvatura negativa, e um teoria de campos conforme (em inglês, conformal field theory, CFT), uma teoria de campos que possui simetria por transformações de escala. Essa foi uma das descobertas mais espetaculares da teoria de cordas e que atraiu muita atenção. Essa correspondência também é uma realização do princípio holográfico mencionado anteriormente. A teoria de campos vive na borda do espaço descrito pela teoria gravitacional. Quando a teoria de calibre vive em um espaço de d dimensões, a teoria gravitacional correspondente é definida em um espaço de $d + 1$ dimensões. Portanto, através da correspondência, podemos estudar o interior de um espaço em $d + 1$ dimensões analisando a teoria de campos em sua borda de d dimensões.

Usualmente a correspondência é formulada para teorias altamente supersimétricas. Recentemente, tem-se conseguido extrapolar a correspondência para teorias menos supersimétricas. O objetivo, é claro, é descrever o modelo padrão, que não possui nenhuma supersimetria. Será um grande feito quando conseguirmos descrever o modelo padrão através de uma teoria gravitacional.

Integrabilidade

Em geral, quando se estuda um sistema físico, não é possível resolver as equações que o descrevem de forma exata. Como explicado acima, alguma técnica perturbativa é necessária. Entretanto, existem alguns poucos sistemas que possuem soluções exatas. Tais sistemas são ditos integráveis e usualmente aparecem em modelos

Glossário

Bósons de calibre: as partículas bosônicas, com spin 1, que transportam as forças fundamentais da natureza. O fóton é o responsável pelas forças eletromagnéticas, os W e Z pelas forças fracas, e os glúons pelas forças fortes. Os bósons de calibre são descritos pelas teorias de calibre.

Teorias de calibre: formam uma classe da teoria quântica de campos que é fundamentada na idéia de transformações de simetria que podem ser aplicadas localmente, isto é, em cada ponto do espaço-tempo. As transformações de simetria formam o grupo de calibre. O modelo padrão das partículas elementares é uma teoria deste tipo.

Grupo de calibre: é o grupo formado pelas transformações de simetria de uma teoria de calibre. O grupo de calibre do modelo padrão das partículas elementares é $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.

Corda Tipo 1: uma das cinco teorias de cordas existentes em 10 dimensões. É formada por cordas abertas com grupo de calibre $SO(32)$.

Corda Heterótica E8 X E8 e SO(32): duas das cinco teorias de cordas existentes em 10 dimensões. É formada por uma mistura peculiar de cordas fechadas e abertas com grupo de calibre $E8 \times E8$ e $SO(32)$.

Corda Tipo IIA e IIB: duas das cinco teorias de cordas existentes em 10 dimensões. É formada por cordas fechadas que apresentam simetria esquerda-direita (tipo A) e não apresentam tal simetria (tipo B).

p-brana ou D-p-brana: objeto estendido com p dimensões espaciais onde as extremidades das cordas abertas estão fixas. Nesta situação a corda obedece condições de contorno de Dirichlet, daí o nome D-branas.

Supersimetria: simetria de uma teoria quântica de campos que requer que a cada partícula bosônica exista uma companheira supersimétrica fermiônica e vice-versa.

Supergravitação: teoria de gravitação que é supersimétrica. O companheiro supersimétrico do gráviton é o grávitino que possui spin $3/2$.

Espaço de anti-De Sitter ou AdS: é um espaço que apresenta curvatura negativa. Pode ser obtido a partir das equações de Einstein com uma constante cosmológica negativa.

simplificados construídos em poucas dimensões.

Recentemente, descobriu-se que a teoria de cordas na correspondência AdS/CFT é um modelo desse tipo. Isso significa que a teoria de campos correspondente também deve ser integrável. Isto é surpreendente, pois nunca se imaginou que teorias de calibre em dimensões maiores que duas pudessem apresentar esse tipo de propriedade. Nestes últimos anos, muita atividade tem se desenvolvido em torno desse tópico, novamente levando a resultados bastante notáveis.

Conclusão

Ao longo do século XX, descobriu-se que o conceito de unificação é essencial na construção de teorias que descrevem o comportamento das partículas elementares. O modelo padrão, que deu origem a vários prêmios Nobel, é extre-

mamente eficaz nessa tarefa e tem sido testado exaustivamente. Infelizmente, ele não incorpora a força gravitacional e começa a apresentar sinais de que deve ser estendido. A única forma de incorporar a força gravitacional em uma teoria quântica leva, necessariamente, à teoria de cordas. Ela faz diversas previsões, como a existência de dimensões extras, supersimetria, dualidades, etc. Até o momento, porém, não há nenhuma forma de comprovar experimentalmente que a teoria esteja correta. Por falta de alternativas, e pela beleza intrínseca que ela apresenta, é a teoria mais estudada atualmente. Por enquanto, só podemos torcer para que sejam encontrados alguns indícios de que a Natureza realmente utiliza as cordas. Talvez os primeiros sinais apareçam no LHC. Vamos aguardar.

Para saber mais

Existem vários livros e artigos que discutem a teoria de cordas, o modelo padrão e a relatividade geral. Dentre eles recomendamos:

Brian Greene, *O Universo Elegante* (Cia. das Letras, São Paulo, 2001).

L. Susskind, *Physics World* **November**, 29 (2003).

S. Hawking, *O Universo Numa Casca de Noz* (Editora ARX, São Paulo, 2002).

S. Weinberg, *Scientific American* **December**, 36 (1999).

Victor O. Rivelles, *Ciência Hoje* **23**:138, 46 (1998).

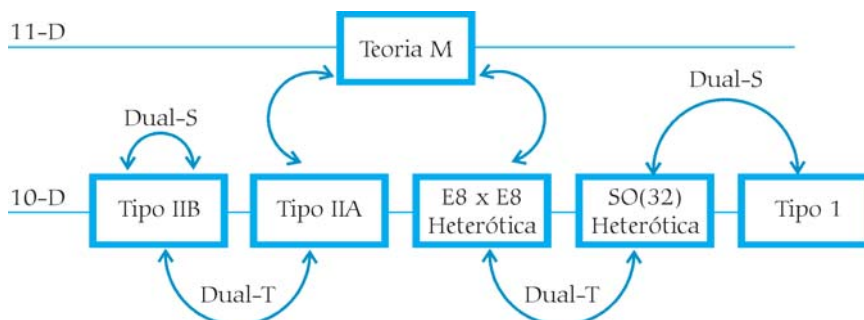


Figura 6. Dualidades entre as 5 teorias de cordas e a teoria-M. A seta entre duas teorias indica que elas estão relacionadas pela dualidade.



A "atração" entre sombras

Um intrigante fenômeno óptico

Quando a distância entre duas sombras se torna muito pequena, uma delas "atrai" a outra, deformando-a! Vejamos como esse fascinante fenômeno ocorre e pode ser explicado. Na Fig. 1, uma seqüência de fotos mostra a sombra da cabeça do fotógrafo se aproximando da sombra de uma parede, resultando na deformação da sombra da parede e o prematuro preenchimento do espaço antes iluminado.

Na Fig. 2, uma seqüência de fotos mostra a sombra da aba do alpendre "atraindo" a sombra da cabeça do fotógrafo e a deformando. Diferentemente do caso anterior, agora é a sombra da cabeça do fotógrafo que se deforma e avança em direção à sombra do alpendre.

Embora a "atração" entre as sombras seja conhecida no teatro de sombras,¹ ela parece ser muito pouco conhecida entre os físicos. Ao demonstrarmos esse efeito para vinte e três colegas, professores universitários de física, apenas um o conhecia (lem-

.....
Fernando Lang da Silveira
 E-mail: lang@if.ufrgs.br

Rolando Axt
 Instituto de Física
 Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 Porto Alegre, RS, Brasil

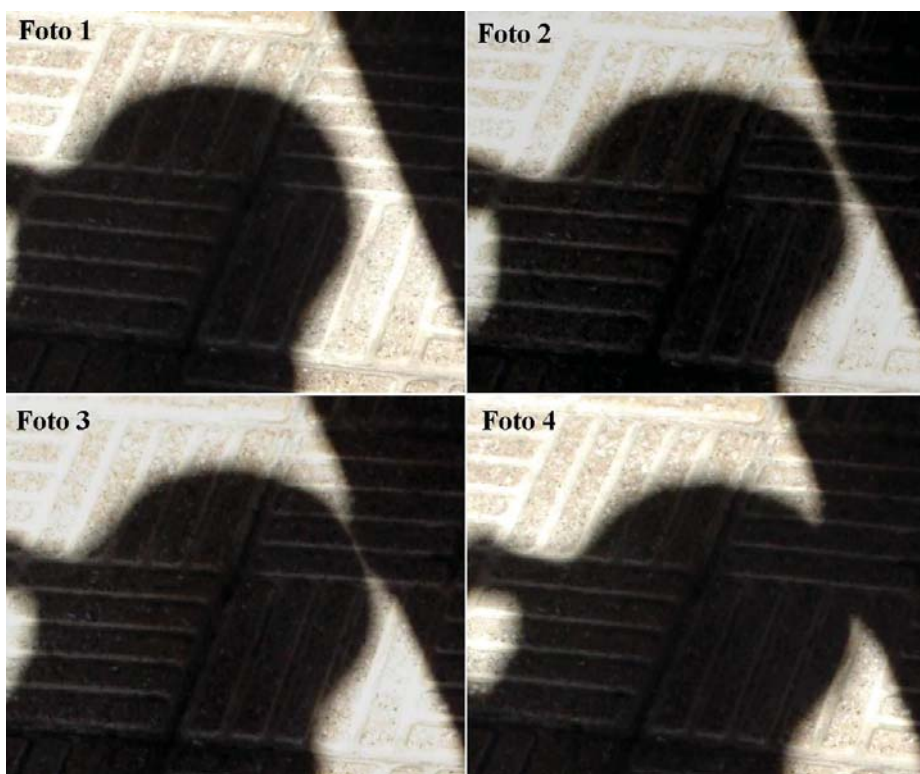


Figura 1. Projetada sobre a calçada, a sombra da cabeça do fotógrafo "atrai" a sombra da parede, deformando-a.

Um inusitado efeito ocorre quando a distância entre duas sombras se torna muito pequena: uma das sombras se deforma, como que atraída pela outra, preenchendo prematuramente o espaço que as separa. Apresentamos uma explicação geométrica para esse fascinante efeito, tendo por base o fato de que as fontes luminosas são extensas, produzindo sombras com bordas indefinidas, devido à penumbra.

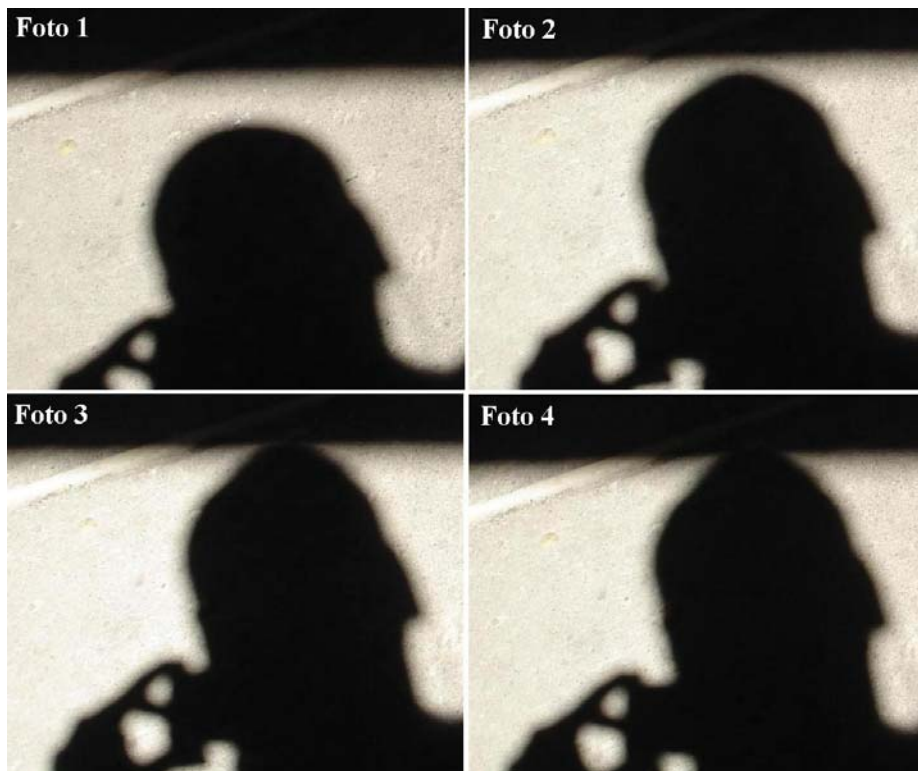


Figura 2. Projetada sobre a calçada a sombra da aba do alpendre “atrai” a sombra da cabeça do fotógrafo, deformando-a.

brando da sua infância a brincadeira de ‘espichar a sombra’; ele ignorava, entretanto, a razão de tal inusitado comportamento. Quando alguns dos colegas ensaiavam espontaneamente uma explicação científica, recorriam invariavelmente à difração e à interferência da luz.²

Antes de esclarecermos as razões do inusitado comportamento, esboçaremos o enunciado de uma lei de “atração” entre sombras que pode ser testada facilmente pelo leitor: *Quando duas sombras se aproximam, aquela que se encontra mais próxima do objeto que lhe corresponde será “atraída” (deformada) pela outra sombra, a do objeto mais distante.*

Na Fig. 1, para obter a deformação da sombra da parede, o fotógrafo encontrava-se mais distante da própria sombra do que a parede da sua. Na Fig. 2, a situação se inverte: o chão estava mais próximo da cabeça do fotógrafo do que da aba do alpendre.

Fontes luminosas extensas produzem sombras com bordas indefinidas

O fato de o Sol ser uma fonte luminosa extensa que subtende, para

pontos situados na Terra, um pequeno ângulo de aproximadamente $0,5^\circ$, faz com que raios luminosos provenientes de regiões diferentes do disco solar incidam aqui na Terra segundo direções diferentes. Por isso as sombras produzidas por obstáculos que interceptam a luz solar não têm bordas bem definidas. As sombras só teriam bordas bem definidas se todos os

raios luminosos solares fossem paralelos entre si (o que se assume para fazer representações simplificadas da radiação solar) e então o fascinante fenômeno da “atração” entre sombras não ocorreria.

As Figs. 3a e 3b representam de maneira esquemática a luz emitida pelos extremos do disco solar, passando por um ponto da borda de um obstáculo e gerando uma região de penumbra (região dentro da qual a iluminação varia desde um mínimo – sombra – até a iluminação plena).

Na Fig. 3a a incidência dos raios solares que atingem o plano horizontal onde ocorre a sombra é quase perpendicular a este plano.³ A situação em que o Sol se encontra baixo no céu é apresentada na Fig. 3b. Comparando essa figura com a Fig. 3a, podemos observar uma maior extensão de penumbra sobre o plano horizontal.⁴ A rigor, em vez de usar um tom cinza claro para indicar o intervalo que corresponde à penumbra nas situações apresentadas nas Figs. 3a e 3b, deveríamos preencher esse intervalo com uma variação contínua entre o cinza escuro (sombra) e o branco (iluminação plena), ratificando a inexistência de bordas não definidas, como indicado na legenda dessas figuras.

A Fig. 4 representa, em uma escala conveniente, o aumento da iluminação solar, calculada sobre o plano onde é projetada a sombra, a partir do inte-

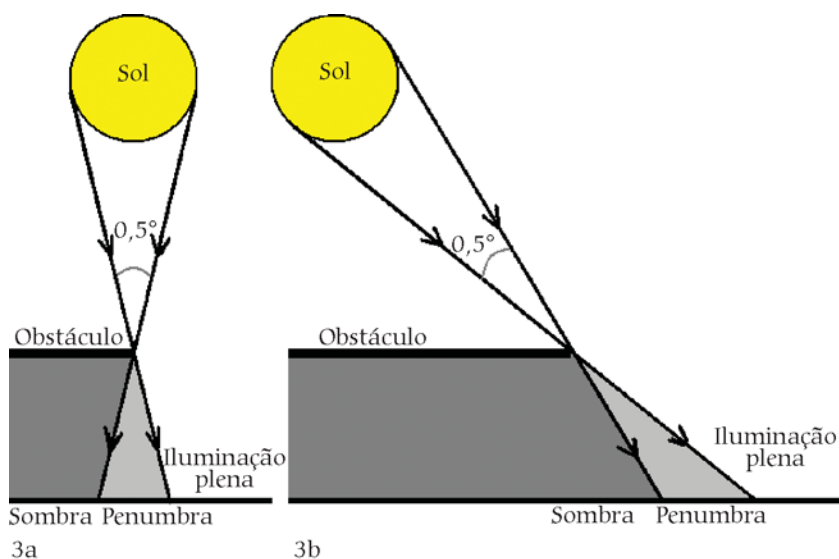


Figura 3. A luz solar que se origina em regiões diferentes do disco solar produz sombras com bordas não definidas (penumbra).

rior desta até a região de iluminação plena, em função da posição sobre uma reta neste plano, tal como esquematizado na Fig. 3. Entre as regiões de sombra e de iluminação plena, existe a penumbra, onde a iluminação varia proporcionalmente à área da parte do disco solar não encoberta pelo obstáculo. Abaixo do eixo horizontal das posições, na Fig. 4, representamos um obstáculo (indicado por um retângulo), juntamente com as partes por este encobertas, ou não, do disco solar, correspondente às seguintes cinco posições específicas do gráfico apresentado: o disco solar totalmente encoberto (sombra), três posições distintas de Sol parcialmente encoberto (penumbra) e ainda o disco solar totalmente exposto (iluminação plena).

A intersecção das regiões de penumbra produz a "atração" entre as sombras

A Fig. 5 representa dois obstáculos próximos um do outro e posicionados a diferentes distâncias do plano que contém as suas sombras, de tal forma que ocorra intersecção das regiões de penumbra associadas a cada obstáculo.⁵ Nesta figura representa-se a iluminação na região de penumbra (entre "Sombra 1" e "Sombra 2") por barras claras sobre um fundo cinza. O espaçamento entre as barras torna-se menor conforme a iluminação aumenta. Além disso, à semelhança do que visualizamos na Fig. 4, desenhámos também cada um dos obstáculos, juntamente com as partes expostas e encobertas do disco solar para diversas posições no plano que contém as sombras.

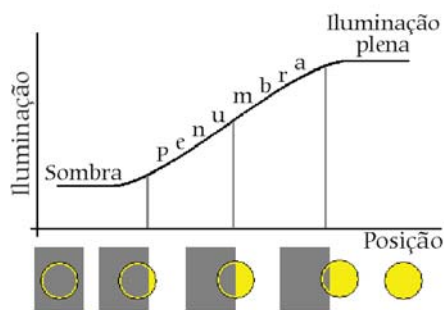


Figura 4. Variação de iluminação sobre diferentes regiões do plano onde a sombra ocorre.

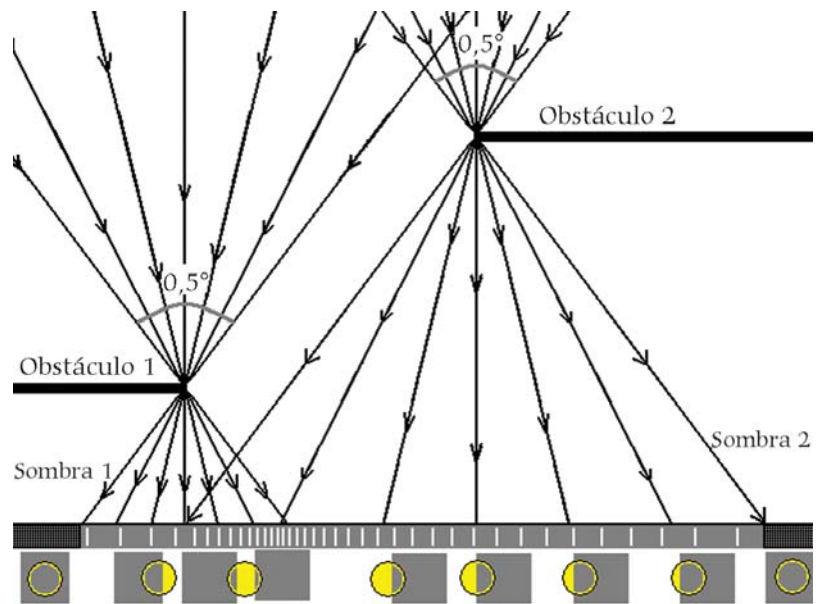


Figura 5. Dois obstáculos originando uma pequena intersecção entre regiões de penumbra.

A Fig. 6 representa obstáculos ainda mais próximos um do outro. Neste caso, o obstáculo 2 suprime raios luminosos no lado mais escuro da região de penumbra do obstáculo 1, contígua à sombra 1 original (representada na Fig. 5). Desta forma, a sombra do obstáculo 1 se amplia explicando-se assim a "atração" da sombra do obstáculo 1 pela sombra

do obstáculo 2.

É importante destacar que a construção geométrica na Fig. 6 implica necessariamente a ampliação da sombra projetada pelo obstáculo 1. É impossível que o mesmo efeito ocorra na sombra do obstáculo 2, pois seria necessária a supressão de raios luminosos próximos a essa sombra, o que é geometricamente injustificável.

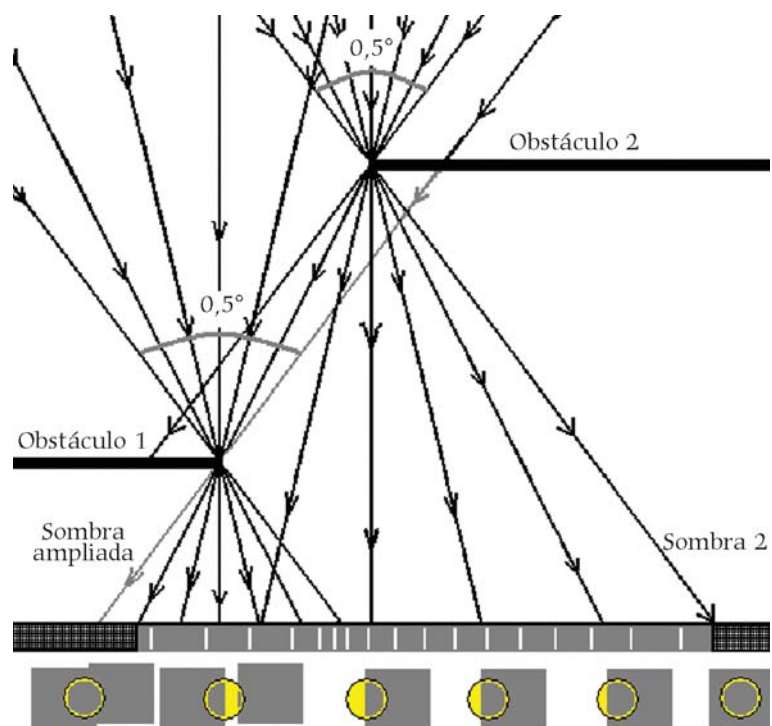


Figura 6. Devido ao aumento da intersecção entre as regiões de penumbra, a sombra que está mais próxima do seu correspondente obstáculo acaba sendo ampliada.

Explica-se assim, qualitativamente, o enunciado que denominamos *lei da "atração" entre as sombras*.

Curvas de iluminação no plano onde as sombras ocorrem

Uma abordagem quantitativa para a explicação da "atração" entre as sombras é possível com auxílio do traçado das curvas de iluminação no plano onde o efeito ocorre. O princípio subjacente ao cálculo dessas curvas é que a iluminação, em uma região do plano que contém as sombras e a penumbra, varia proporcionalmente à área do disco solar exposta (a parte do Sol não encoberta pelos obstáculos) para aquela região. Com base nesse pressuposto, calculamos e representamos as curvas de iluminação (Fig. 7), no plano onde as sombras ocorrem, para quatro posições relativas dos dois obstáculos, supondo que o obstáculo 2 se encontre três vezes e meia mais afastado da superfície onde as sombras são observadas do que o obstáculo 1. O obstáculo 2 avança para a esquerda (sua borda passando sucessivamente pelas posições A, B, C e D indicadas na parte superior da Fig. 7), paralelamente à superfície onde as sombras são observadas, enquanto o obstáculo 1 permanece parado em relação à origem do eixo das posições. Tomamos como unidade de medida de posição a metade da largura da região de penumbra que apenas o obstáculo 1 determinaria caso não existisse o outro obstáculo.

Vejam inicialmente, tomando por base as curvas de iluminação representadas na Fig. 7, o que acontece com a sombra do obstáculo 2. Quando este obstáculo avança paralelamente ao plano onde as sombras ocorrem, aproximando-se do obstáculo 1, a sombra 2 avança pelo mesmo espaço que o obstáculo 2 percorreu (para verificar isto, basta comparar as posições da borda do obstáculo 2, no topo da Fig. 7, com a posição do início da sombra 2 - início da linha de iluminação constante). Desta forma, este resultado teórico é consistente com o que se observa quando as duas sombras são aproxima-

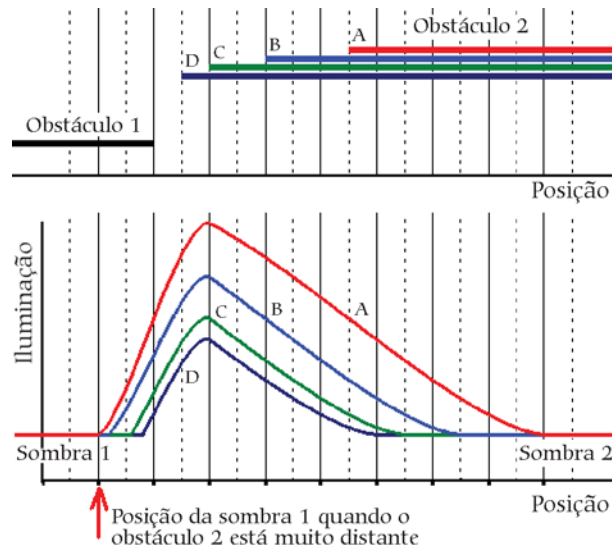


Figura 7. Curvas de iluminação no plano onde as sombras ocorrem para diversas posições relativas dos dois obstáculos.

das: uma delas, a sombra 2, avança sem sofrer modificações na sua forma.

A seguir vamos analisar o que ocorre com a sombra do obstáculo 1. As curvas de iluminação mostram que inicialmente, quando o obstáculo 2 se encontra mais afastado (posição A do obstáculo 2), a extensão da sombra 1 não é ainda afetada por esse obstáculo. Mas, quando o obstáculo 2 passa sucessivamente pelas posições B, C e D, nota-se que a linha que corresponde à iluminação constante no lado esquerdo da Fig. 7 (identificando a

sombra 1), avança para a direita, ou seja, a sombra 1 se amplia, deformando-se. Este resultado teórico, já antecipado qualitativamente na seção anterior, é consistente com o que se observa quando uma sombra se aproxima da outra (conforme as fotografias das Figs. 1 e 2): uma das duas sombras (sempre aquela que corresponde ao obstáculo mais próximo do plano onde o efeito ocorre) será "atraída" pela outra sombra, preenchendo prematuramente o espaço iluminado que separava originalmente as duas sombras.

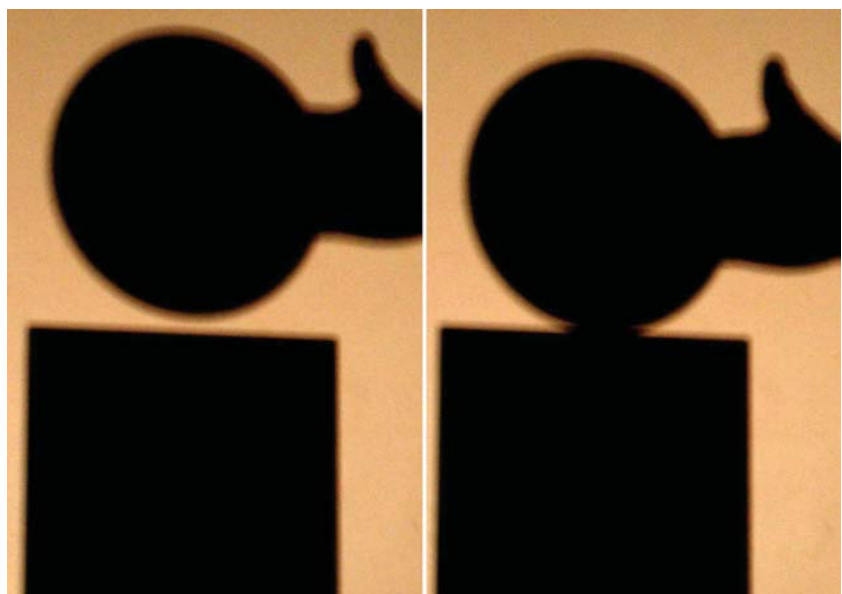


Figura 8. A sombra da placa é "atraída" pela sombra da bola.

A “atração” entre as sombras no laboratório

É possível também em laboratório se observar o fenômeno da “atração” entre as sombras. Em uma sala escura colocamos uma lâmpada e em uma parede do outro lado da sala fotografamos as sombras de objetos postados próximos à parede. A Fig. 8 apresenta as fotografias das sombras de uma placa e de uma bola, estando a primeira mais próxima da parede do que a segunda. Observa-se então

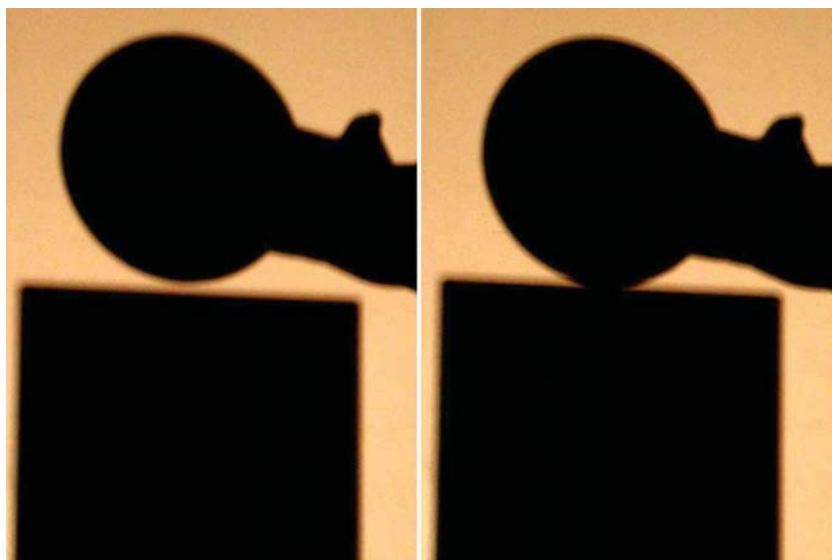


Figura 9. A sombra da bola é atraída pela sombra da placa.

a “atração” da sombra da placa pela sombra da bola.

Na Fig. 9 a sombra da bola é “atraída” pela sombra da placa, pois agora a bola encontra-se mais próxima da parede.

Conclusão

As sombras exercem um grande fascínio no homem desde épocas remotas, conforme conta Casati [1] em um texto imperdível para quem queira se inteirar sobre uma grande quantidade de fenômenos, apli-

cações e eventos históricos nos quais as sombras tiveram papel central. Mas o tema que discutimos neste artigo não é notado no livro de Casati, nem em diversos outros livros pesquisados. Na extensa obra de Minnaert [2], um clássico da literatura sobre luz e óptica ao ar livre, o efeito da “atração” entre as sombras não é sequer mencionado. Apenas em um texto paradidático sobre experimentos de física encontramos uma atividade de ‘espichamento de sombras’, cujo título poderíamos traduzir livremente do alemão como *O Nariz de Pinóquio* [3].⁶

Alertados por um aluno sobre o efeito de “atração” entre as sombras e tendo sido indagados sobre as suas razões, decidimos buscar uma explicação, agora concretizada neste artigo. Cremos que o apelo do inusitado que tal efeito apresenta pode servir de motivação (e tem servido em nossas aulas) para uma discussão profícua sobre óptica geométrica.

Agradecimento

Agradecemos à Prof^a Maria Cristina Varriale do IM-UFRGS pela leitura crítica deste artigo e pelas sugestões apresentadas.

Referências

- [1] R. Casati, *A Descoberta da Sombra* (Companhia das Letras, São Paulo, 2001).
- [2] M. Minnaert, *The Nature of Light and Colour in the Open Air* (Dover, New York, 1954).
- [3] J. Wittmann, *Trickkiste 1 - Experimente, wie sie nicht im Physickbuch stehen* (Bayerischer Schulbuch-Verlag, München, 1986).

Notas

¹Uma professora de física do ensino médio que faz teatro de sombras nos relatou ser o efeito conhecido e usado pelos

praticantes desta arte.

²Eles logo consideravam a explicação falsa ao serem alertados de que a distância entre os dois corpos que produziam sombras era muitíssimo maior do que o comprimento de onda da luz, condição essa que impede efeitos perceptíveis de difração.

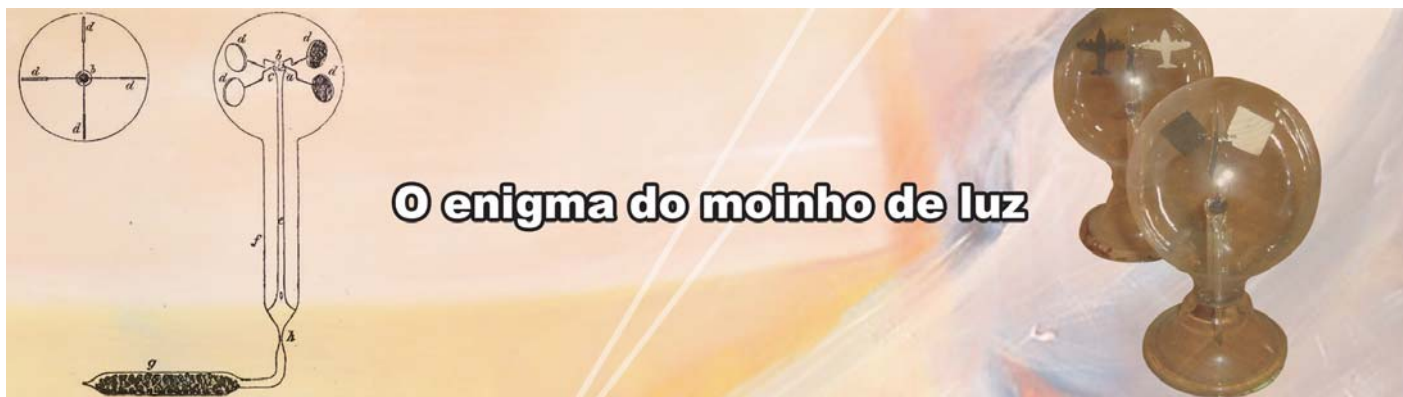
³A incidência perpendicular dos raios de luz solar sobre o plano onde acontece a sombra é a condição para a menor extensão da região de penumbra, isto é, aproximadamente 0,9 cm para cada metro de distância entre o objeto que projeta a sombra e o plano.

⁴As fotos apresentadas nas Figs. 1 e 2 foram tiradas no final da tarde com o Sol baixo

no céu, sobre uma calçada horizontal.

⁵Para melhor compreensão, o ângulo máximo entre os raios de luz provindos do disco solar em todas as figuras está muito exagerado pois, conforme já notado, esse ângulo é de apenas 0,5°.

⁶Este autor apresenta uma explicação para o efeito do ‘espichamento de sombras’ que, em nossa opinião, não é suficientemente clara. Ela envolve aspectos objetivos da óptica geométrica, incorporando também detalhes subjetivos da percepção visual humana. A nossa explicação é completamente objetiva, consistente com o que se registra nas fotografias.



⊙ enigma do moinho de luz

.....
José Pedro Rino

(djpr@df.ufscar.br)

Nelson Studart

(studart@df.ufscar.br)

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

.....

Introdução

O radiômetro de Crookes, também conhecido como moinho de luz, foi originalmente projetado como um medidor de radiação, mas hoje pode ser considerado apenas um instrumento atrativo para alunos e curiosos, podendo ser usado para demonstração em sala de aula. Consiste de quatro hélices presas em braços que podem girar em torno de um pino vertical com atrito muito pequeno. Todo o mecanismo é encapsulado em um invólucro de vidro e o gás é parcialmente evacuado por uma bomba, como mostrado na Fig. 1. As hélices têm tons claros (prateado) e escuros (preto) dispostas alternadamente. Elas começam a girar quando luz de qualquer natureza (solar, artificial ou até mesmo radiação infravermelha produzida pelo calor da mão) incidem em sua superfície. O moinho de luz gira com o lado claro fugindo do lado escuro. O resfriamento do radiômetro causa rotação em sentido contrário.

Há algum tempo, um dos autores (N.S.) assistiu em um programa de divulgação científica de nossa TV a explicação sedutora, porém equivocada, de que o fenômeno de rotação do cata-vento devia-se ao choque de fótons incidentes sobre as palhetas. Daí surgiu a idéia deste artigo, tendo em vista que do mesmo modo a explicação inicial, fornecida pelo próprio

Crookes, atribuía à pressão da radiação eletromagnética a causa do efeito. Aqui entre nós, é curioso observar que muitos físicos ainda hoje pensam que sabem como o radiômetro funciona, mas uma grande maioria desconhece seu funcionamento devido a sutilezas que esperamos elucidar neste artigo.

Um pouco de história

Sir William Crookes (1832-1919) desenvolveu seu radiômetro em 1873 como um dispositivo para medir a energia radiante do calor (infravermelho) e da luz solar ao investigar o efeito da radiação infravermelha sobre o elemento químico tálio, recém descoberto por ele próprio. A Fig. 2 mostra um diagrama esquemático do radiômetro original de Crookes, de 1876. O fenômeno atraiu a

**Uma explicação sedutora
 – mas equivocada –
 para o moinho de luz é
 aquela que aponta a
 rotação das palhetas como
 devendo-se ao choque de
 fótons incidentes sobre elas**

atenção de grandes nomes da ciência que buscaram determinar suas causas e vários deles contribuíram para a explicação correta do funcionamento do moinho de luz. Desde Isaac Newton (1642-1727) e sua teoria corpuscular da luz, vários experimentos foram projetados para medir a pressão da luz sobre corpos delgados. Os resultados foram frustrantes. Em especial, Abraham Bennet (1749-1799) ao iluminar um cata-vento de papel em vácuo imperfeito não conseguiu “observar qualquer movimento perceptível dos efeitos do calor”.

Este artigo explica como o popular moinho de luz, ou radiômetro de Crookes, funciona, alertando para concepções equivocadas de uso generalizado.



Figura 1. Um radiômetro atual que pode ser adquirido em boas lojas do ramo.

Thomas Young (1773-1829), que confirmou a natureza ondulatória da luz, utilizou os resultados negativos de Bennet contra a teoria corpuscular, e obviamente a favor da teoria ondulatória. Crookes apresentou suas observações na Royal Society of London e seu trabalho foi analisado por James Clerk Maxwell (1831-1879). Maxwell, a princípio, teria se deliciado ao constatar uma demonstração do efeito da pressão da radiação prevista em sua teoria eletromagnética da luz. No entanto, uma observação singela contrariava a explicação baseada no efeito da pressão da radiação. A luz incidindo no lado escuro das hélices seria absorvida, enquanto que ao incidir sobre o lado claro deveria ser refletida. Como resultado final, deveria haver uma pressão de radiação duas vezes maior do lado claro em relação ao lado escuro. Neste caso, o moinho de luz giraria na direção contrária da observada. Crookes, como nosso divulgador científico, estariam errados.

Arthur Schuster (1851-1934) confirmou em um experimento crucial que a origem do “efeito radiômetro” era um fenômeno devido ao gás e não à radiação. Maxwell e Osborne Reynolds (1842-1912) explicaram qualitativamente o correto funcionamento do radiômetro

em dois artigos publicados em 1879. Devido à falta de informação sobre a temperatura das hélices, uma explicação qualitativa já era suficiente. Ao final dos anos 1870, todo o entusiasmo científico inicial causado pela descoberta de Crookes havia desaparecido, embora na década de 1920 o interesse tenha retornado inclusive com uma notável contribuição de Albert Einstein (1879-1955).

A explicação termodinâmica usual

Como o efeito do moinho de luz é um fenômeno do gás, sua explicação, à primeira vista, poderia ser dada de modo bem simples. O lado escuro absorve mais calor da radiação infravermelha do que o lado claro. Por conseguinte, o gás rarefeito próximo ao lado escuro estaria mais quente do que no lado claro. A pressão do gás do lado escuro aumentaria com sua temperatura, provocando uma força maior no lado escuro do que no lado claro. Esta força faria o cata-vento girar na direção observada. Este resultado pode ser obtido quantitativamente analisando a pressão exercida pelas moléculas, que é proporcional ao momento transferido em uma colisão contra uma superfície. Quando a temperatura do gás, próximo à palheta, aumenta, a energia cinética média das moléculas também cresce, assim como o momento transferido por cada molécula para a palheta. Um cálculo simples mostra que a diferença relativa da pressão é proporcional à diferença relativa da temperatura, *i.e.*,

igual à temperatura da superfície do Sol.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{4} \frac{\Delta T}{T}$$

Esta é uma explicação alterna-

tiva convincente, apesar de estritamente incorreta, e que pode ser usada em uma primeira introdução ao tema porque leva a alguns resultados qualitativos corretos. Por exemplo, considere o radiômetro

Schuster confirmou em um experimento crucial que a origem do “efeito radiômetro” era um fenômeno devido ao gás e não à radiação, mas uma explicação qualitativamente correta para o efeito só foi dada por Maxwell e Reynolds

como uma máquina térmica funcionando entre duas temperaturas. Ao aquecer o radiômetro, mesmo na ausência de uma fonte de luz, este irá girar. Colocando-o em um local escuro e frio (por

exemplo, dentro de um refrigerador), o radiômetro irá girar no sentido contrário. A superfície escura é um bom absorvedor de luz e de radiação térmica, e também, pela lei de Kirchoff, um bom radiador. Conseqüentemente a parte enegrecida irá esfriar mais rapidamente do que a parte clara, fazendo com que as hélices girem na direção reversa. Tal movimento continuará até que ambas as superfícies atinjam o equi-

líbrio térmico. Na presença da luz solar, que é convertida em calor pelas superfícies escuras das hélices, o movimento giratório permaneceria indefinidamente até atingir o equilíbrio, ou seja, até que a temperatura do radiômetro seja

Maxwell, a princípio, teria se deliciado ao constatar uma demonstração do efeito da pressão da radiação prevista em sua teoria eletromagnética da luz. No entanto, uma observação singela contrariava a explicação baseada no efeito da pressão da radiação

igual à temperatura da superfície do Sol.

A solução correta: o fenômeno da “transpiração térmica”

No entanto, a explicação acima, que ainda hoje consta da Enciclopédia Britânica, é também falha. O argumento é simples. A pressão sobre uma superfície não é apenas proporcional ao momento transferido no impacto, mas depende também da taxa com que as moléculas atingem a superfície. As moléculas da superfície mais quente que colidem de forma bem rápida impedem efetiva-

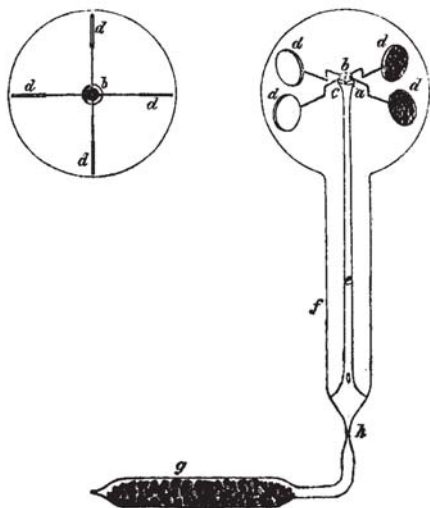


Figura 2. O radiômetro original de Crookes como aparece em seu artigo de 1876.

mente que outras moléculas atingem a superfície. Se a superfície é extensa e suas bordas podem ser desconsideradas, estes dois fatores se compensam. Maxwell mostrou que simplesmente o gás mais quente se expande para atingir o equilíbrio térmico e nenhuma força líquida é gerada, apenas um fluxo de calor no cata-vento.

A questão central é determinar a origem da força necessária para fazer girar as hélices do moinho de luz. Em trabalho anterior, Reynolds havia mostrado que se a face de uma placa porosa é mantida mais quente, a interação entre as moléculas do gás e a parede porosa é tal que o gás flui da face mais fria para face mais quente. As hélices do radiômetro não contêm poros, mas mostrou-se que as bordas das hélices comportam-se de modo semelhante aos poros da placa de Reynolds. Portanto as moléculas do gás movem-se do lado claro para o lado escuro.

A verdadeira razão para o funcionamento do moinho de luz são as forças exercidas pelo gás residual sobre as bordas das hélices. A explicação baseada na diferença de pressão sobre toda a superfície quente, embora não totalmente correta, é convincente e pode ser usada em uma discussão introdutória da questão

De fato, experimentos realizados na década de 1920 demonstraram que as forças exercidas pelo gás residual, necessárias para girar as hélices do radiômetro, ocorrem nas bordas das hélices. Vimos que as colisões de moléculas sobre a palheta do lado mais quente atuando sobre uma superfície extensa não

são as responsáveis pela geração de uma força que faça girar o cata-vento. No entanto, analisemos as colisões das moléculas em uma faixa da ordem do seu livre caminho médio nas proximidades das bordas do cata-vento. A situação neste caso é bem diferente. Uma fração de moléculas é impedida de atingir a superfície por moléculas que ricocheteiam no cata-vento e outra fração por moléculas que passam pela borda advindas do lado mais frio. Mas este último mecanismo é menos eficiente em frear as moléculas incidentes. Portanto, além das colisões moleculares na hélice serem, em média, tão intensas

quanto no centro do lado quente, uma taxa maior destas colisões por unidade de área irá ocorrer. A pressão próxima à borda será então maior do que a pressão no centro da hélice do lado mais quente, e, portanto, será também maior do

que a pressão no outro lado. É, pois, esta diferença de pressão nas bordas a responsável pelo movimento das hélices.

Conclusão

Esperamos ter convencido os leitores de que o fenômeno do moinho de luz não se deve à pressão da

O fenômeno do moinho de luz não se deve à pressão da radiação porque a rotação das hélices é contrária à prevista

radiação porque a rotação das hélices é contrária à prevista. É claro que existe a pressão de radiação, mas esta é mascarada pelas forças exercidas pelo gás. Ele também não

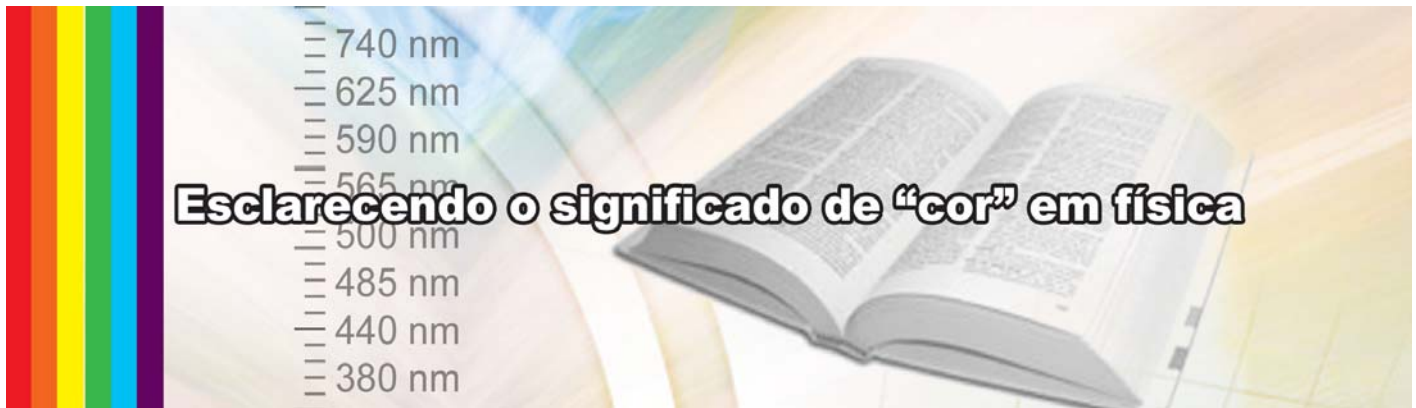
funciona devido à diferença da pressão total exercida pelas moléculas do gás nos lados mais quentes da hélice porque esta

diferença rapidamente desaparece para que o equilíbrio térmico seja alcançado. A verdadeira razão para o funcionamento do moinho de luz são as forças exercidas pelo gás residual sobre as bordas das hélices. Em um certo sentido, a explicação baseada na diferença de pressão sobre toda a superfície quente, embora não totalmente correta, é convincente e pode ser usada em uma discussão introdutória da questão, como na experiência descrita acima do radiômetro dentro do refrigerador. Mas este argumento é falacioso para explicar por que o radiômetro só funciona com gás a baixa pressão. A explicação baseada em colisões de quanta de luz apenas sobrevive para experiências extremamente sofisticadas com radiômetros com ultravácuo, o que não corresponde aos usuais moinhos de luz.

Agradecemos ao Silvio Dahmen pela leitura do artigo.

Referências

- A.E. Woodruff, *The Physics Teacher* **6**, 358 (1968).
- P. Gibbs, *How does a Light-Mill Work?*, <http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html> Acesso em 13/2/2007.
- Wikipedia, *Crookes Radiometer*, http://pt.wikipedia.org/wiki/Radi%C3%B4metro_de_Crookes (tradução direta do verbete em inglês). Acesso em 20/3/2007.



Esclarecendo o significado de “cor” em física

Introdução

Nos textos de física elementar [1], a luz visível é definida como aquela radiação eletromagnética à qual o olho humano é sensível, e o espectro visível é associado, com base em um observador padrão, a uma faixa de comprimentos de onda compreendida entre 380 nm e 740 nm, à qual corresponde uma faixa de frequências que vai dos 790 THz aos 405 THz (a relação matemática entre o comprimento de onda λ e a frequência f da radiação eletromagnética no vácuo é $\lambda f = c$, sendo c a velocidade com que a luz se propaga no vácuo, $c \approx 3.0 \times 10^8$ m/s). A sensibilidade do olho humano aos diferentes comprimentos de onda da radiação visível não é constante, e é ilustrada tipicamente com um gráfico semelhante ao da Fig. 1, onde se mostra a sensibilidade relativa em função do comprimento de onda.

Observa-se neste gráfico que, aos diferentes comprimentos de onda, são associadas as diferentes “cores” que o olho detecta. Assim, por exemplo, a máxima sensibilidade ocorre para luz de comprimento de onda $\lambda \approx 550$ nm

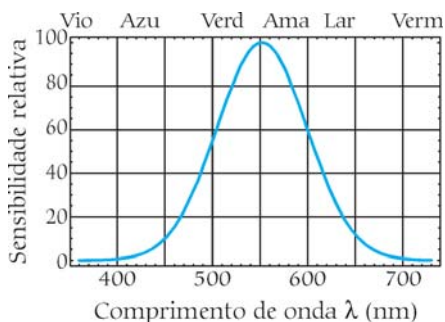


Figura 1. Sensibilidade relativa do olho humano em função do comprimento de onda.

(cor verde).

A Tabela 1 “classifica” as diferentes cores segundo o comprimento de onda e a frequência da luz. No entanto, convém sublinhar, “a atribuição de cores às várias regiões do espectro visível é algo arbitrário, já que a cor é, fundamentalmente, um conceito psicológico e não uma quantidade física mensurável” [1].

Quando a luz se propaga em um meio material, a sua velocidade (v) é menor do que no vácuo (c). Este fato permite definir o índice de refração n do material através da relação $n = c/v$. Nestas circunstâncias a relação entre o comprimento de onda (λ') e a frequência (f') é

$$\lambda' f' = v = \frac{c}{n} = \frac{\lambda f}{n}$$

Como a frequência da luz não depende do meio em que ela se propaga (isto é uma consequência direta das condições de fronteira que, de acordo com as equações de Maxwell, devem ser satisfeitas na superfície que separa dois meios materiais [2, 3]), temos $f' = f$, e o comprimento de onda da luz em um meio material vem dado por $\lambda' = \lambda/n$.

Neste ponto pode surgir a seguinte dúvida: o conceito de cor deve ser associado à frequência, ou ao comprimento de onda? A dúvida é pertinente, uma vez que, ao passar de um meio material para outro, o comprimento de onda muda mas a frequência não é alterada. Apenas uma destas opções parece, portanto, ser possível. O nosso objetivo aqui é o de resolver esta dúvida.

Primeira tentativa de resposta

Reformulemos a dúvida anterior

.....
Manuel Fernando Ferreira da Silva
 Departamento de Física
 Universidade da Beira Interior
 Covilhã, Portugal
 E-mail: mffs@ubi.pt

Este artigo aborda uma questão associada ao conceito de cor e que costuma gerar diferentes interpretações acerca de sua origem.

Tabela 1: Classificação das cores segundo o comprimento de onda e a frequência da luz.

Cor	$\Delta\lambda$ (nm)	Δf (THz)
Vermelho	$\approx 625-740$	$\approx 480-405$
Laranja	$\approx 590-625$	$\approx 510-480$
Amarelo	$\approx 565-590$	$\approx 530-510$
Verde	$\approx 500-565$	$\approx 600-530$
Ciano	$\approx 485-500$	$\approx 620-600$
Azul	$\approx 440-485$	$\approx 680-620$
Violeta	$\approx 380-440$	$\approx 790-680$

$\Delta\lambda$: Intervalo de comprimentos de onda.
 Δf : Intervalo de frequências.

através da seguinte pergunta: quando um feixe de luz monocromático passa de um meio material para outro, a sua cor muda ou continua a ser a mesma? A idéia inicial que poderíamos ter para responder a esta pergunta é, pura e simplesmente, fazer uma experiência. E uma experiência possível que nos poderia ocorrer seria, colocando os nossos olhos debaixo de água, observar a cor de diversos objectos situados no ar. Uma experiência deste tipo é fácil de implementar em uma piscina ou em uma banheira, por exemplo. Faça o leitor a experiência: verificará que não se observa qualquer mudança de cor nos objetos quando eles são observados debaixo de água.

Se a cor estivesse associada ao comprimento de onda, a diferença de cor seria claramente perceptível: como o índice de refração da água é $n \approx 1.333$, um objeto de cor verde ($\lambda \approx 530$ nm) parecer-nos-ia, observando-o debaixo da água, violeta ($\lambda' \approx 400$ nm). Esta experiência permitir-nos-ia concluir, então, que a cor deve ser associada à frequência e não ao comprimento de onda.

Acontece que esta abordagem é incorreta. É verdade que o fato de observarmos um objeto em condições “normais”, (olhos em contato com o ar), ou colocando os nossos olhos debaixo de água, é totalmente irrelevante com respeito à cor observada do mesmo. Mas a razão é outra: os raios de luz que atingem a retina fazem-no, naturalmente, depois de entrar no olho, e nessa altura esses raios já não estão a deslocar-se nem no ar (primeiro caso) nem na água (segundo caso), mas no fluido ocular (no chamado humor ví-

treo, uma substância gelatinosa e transparente constituída por água em 99% e cujo índice de refração é muito semelhante ao da água: $n_{\text{humor vítreo}} \approx 1.337$.

A procura da resposta à nossa pergunta inicial requer, portanto, outra estratégia.

Indo ao fundo da questão

O insucesso da abordagem anterior leva a concluir que é necessário aprofundar um pouco sobre o significado de “sensação de cor”, que, como foi referido na Introdução, é um conceito psicológico, não físico. Não pretendemos aqui alongar-nos na explicação dos complexos mecanismos envolvidos na “construção” da sensação de cor, nem das teorias existentes sobre a visão das cores; também não abordaremos fenômenos muito interessantes como a mistura das cores ou a constância das cores; limitar-nos-emos a descrever sucintamente aquilo que é relevante para os nossos propósitos (o leitor interessado em aprofundar estes e outros assuntos pode consultar [4]).

A cor que o cérebro interpreta resulta de sinais elétricos que recebe através do nervo óptico, por meio de milhões de células foto-receptoras localizadas na retina e chamadas cones e bastonetes. Existem três tipos de cones e um único tipo de bastonete; a sensação de cor é determinada pelos cones; o que distingue dois cones de diferentes tipos é a sua capacidade para absorverem os fótons de luz que incidem sobre eles, e essa capacidade depende da energia desses fótons.

Ora, a energia E de um fóton é dada por $E = hf$ (onde h é a constante de Planck, $h \approx 6.6 \times 10^{-34}$ J.s) e, como foi referido na Introdução, a frequência f não depende do meio no qual o raio de luz se desloca; logo, chegamos à conclusão (desta vez sim, correta) de que a cor deve ser associada à frequência e não ao comprimento de onda.

Conclusões

Perguntará, então, o leitor, justificadamente: por que motivo é mais freqüente, na grande maioria dos textos, fazer-se a associação da cor com o comprimento de onda (como, por

exemplo, Fig. 1)?

Muito provavelmente, porque estamos mais familiarizados com a unidade “nanômetro” do que com a unidade terahertz; é-nos muito mais fácil “perceber” um comprimento de 500 nm do que uma frequência de 600 THz. A primeira quantidade pode até ser visualizada (com um bom microscópio óptico, ou com um microscópio eletrônico); a nanotecnologia está na ordem do dia. Já uma frequência na faixa dos THz está completamente fora do alcance da nossa imaginação.

Claro que este argumento, por si só, não pode servir de justificativa. Em última análise, a razão é esta: na verdade, não há nada de errado em fazer-se a associação cor-comprimento de onda, desde que o comprimento de onda seja interpretado como sendo o comprimento de onda no vácuo. Esta interpretação é crucial. Infelizmente, a quase totalidade dos textos não explicitam tal interpretação, e daí surge a questão que acabamos de resolver.

Voltando ao exemplo referido em nossa primeira tentativa de resposta: se um feixe de luz de comprimento de onda (no vácuo) $\lambda \approx 530$ nm for recebido pelo olho, o seu comprimento de onda ao atingir a retina será $\lambda' \approx 400$ nm, mas a sensação de cor por ele provocada será aquilo que nós convencionamos chamar cor verde, e não a cor violeta. O que é relevante, para efeitos de cor e em termos de comprimento de onda, é o valor de λ , não o valor de λ' .

Resumindo, e para finalizar: sempre que fizermos a correspondência entre cor e comprimento de onda, devemos “pensar” no comprimento de onda no vácuo.

Referências

- [1] D. Halliday, R. Resnick and K.S. Krane, *Physics* (Wiley, Nova Iorque, 2002), 5th ed, v. 2, p. 886.
- [2] W.K.H. Panofsky and M. Phillips, *Classical Electricity and Magnetism* (Addison-Wesley, Reading, 1962), 2nd ed, p. 196.
- [3] A.B. Henrique e J.C. Romão, *Electromagnetismo* (IST Press, Lisboa, 2006), p. 189.
- [4] D.H. Hubel and T.N. Wiesel, *Brain and Visual Perception: The Story of a 25-Year Collaboration* (Oxford University Press, Oxford, 2004).



A física determinando como o golfinho pesca

Introdução

Golfinho e boto são nomes populares para os cetáceos providos de dentes (odontocetos). Cetáceos são mamíferos de vida aquática, possuindo mecanismos de controle de temperatura, corpo fusiforme¹ e com espessa camada de gordura subcutânea. Um representante nacional destes golfinhos é o tucuxi (*Sotalia guianensis*), que é encontrado em todo o litoral do Brasil.

A variação da sua quantidade de movimento (ou momento linear) é propiciada pelas nadadeiras caudais, enquanto as laterais são responsáveis pela orientação. A pele é lisa e sem pêlos, com exceção de poucos, residuais, os quais, no caso dos golfinhos, inibem a ocorrência do fenômeno de turbulência, que retardaria seu movimento dentro da água [1]. O golfinho tucuxi alimenta-se de peixes, utilizando seus dentes agudos para capturá-los. Apresenta um alto grau de encefalização, nitidamente refletido na vida social complexa (alto nível de organização social) e na variedade de repertórios comportamentais que possui [2].

A respiração é realizada rapidamente na superfície da água, por meio de um espiráculo simples,² localizado no alto da cabeça. O conduto respiratório é isolado da boca, de modo que o golfinho não se afoga engolindo

água (assim como os demais cetáceos) nem lança pelo espiráculo a água recolhida pela boca.

Golfinhos recorrem à ecolocalização para a formação de imagens do ambiente e de suas presas: emitem pulsos ultra-sônicos de frequência variável pela laringe, cujo eco é captado por suas mandíbulas e transmitido por canais até seus ouvidos. Melhoraram sua precisão em situações de perseguição, pela variação da frequência do sonar.

Em situações envolvendo perseguição e captura de presas, a energia química intramuscular do predador se transforma em energia cinética necessária à perseguição, sendo o acúmulo de oxigênio um fator determinante para o sucesso da caçada. Para

Golfinhos recorrem à ecolocalização para a formação de imagens do ambiente e de suas presas: emitem pulsos ultra-sônicos de frequência variável pela laringe, cujo eco é captado por suas mandíbulas e transmitido por canais até seus ouvidos

reduzir o custo do deslocamento, os mamíferos marinhos desenvolveram uma ampla variedade de comportamentos nata-tórios, como controlar a velocidade do deslocamento, aproveitar o deslocamento da onda

(por exemplo, saltando sob as mesmas), aproveitar o deslocamento de embarcações e nadar em cardumes. Para um deslocamento para grandes profundidades, alguns desses mamíferos se impulsionam para baixo e deslizam sem movimento à medida que afundam [3].

Neste trabalho, mostramos como a utilização de conceitos físicos justificam a eficiência predatória do golfi-

.....
Débora Coimbra

Departamento de Física,
Centro de Ciências Tecnológicas,
Joinville, SC Brasil

E-mail: deboracoimbra@terra.com.br

.....
Anderson Luis do Valle e

Franciele C.C. Melo

Instituto Superior de Ensino de Brasília
Brasília, DF, Brasil

.....
Alexandre Marletta

Faculdade de Física
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, MG, Brasil

.....

Através da observação meticulosa da atividade dos golfinhos tucuxi, em Pipa, RN, discutimos como conceitos simples de mecânica, como a adição galileana de velocidades, concorrem para a eficácia das estratégias de caça realizadas por esses mamíferos.

no tucuxi quando este persegue peixes, no litoral do Rio Grande do Norte, pela obtenção de um delicado equilíbrio entre a demanda energética da perseguição e a necessidade de conservação de energia.

A física envolvida

A distribuição dos cetáceos está relacionada à disponibilidade de alimento, especialmente para espécies não-migratórias, e, portanto, é influenciada pelas variáveis oceanográficas. Dentre essas variáveis, observações sistemáticas de Valle *et al.* [4] apontam, com relação à posição corporal usada para dar o bote sobre a presa, que a posição 6 da Fig. 1 foi a mais freqüentemente usada. Para compreender a alta incidência dessa posição [6], utilizamos o movimento relativo galileano.

A energia pode ser avaliada considerando-se os referenciais inerciais, como esquematizado na Fig. 1a, na qual S representa a Terra (ou fundo do mar) e S' é o mar em movimento. O golfinho está, em $t = 0$, na posição $\mathbf{r}' = (0, 0)$, ou seja, na origem do sistema de referência S' . Define-se \mathbf{r}_0 como a posição inicial do golfinho em $t = 0$, em relação ao referencial S , \mathbf{r} é a posição do golfinho (G) em $t > 0$ em relação ao referencial S , e \mathbf{r}' é a posição do golfinho em $t > 0$ em relação ao referencial S' . G é o ponto de ataque do golfinho a uma distância R da origem no sistema S' , $|\mathbf{r}'| = R$.

Representando por \mathbf{v}_m a velocidade do referencial em movimento S' (onda), em relação ao referencial S (Terra), e por \mathbf{v}_G a velocidade do golfinho em relação ao referencial S' , podemos calcular a aceleração do golfinho em função da posição do bote, considerando a Fig. 1b.

A velocidade inicial é dada por

$$\mathbf{v}_0 = \mathbf{v}_m = v_m \hat{\mathbf{i}}, \quad (1)$$

e a velocidade final será

$$\mathbf{v} = (v_m + v_G \cos \alpha) \hat{\mathbf{i}} + v_G \sin \alpha \hat{\mathbf{j}},$$

sendo o ângulo α definido na Fig. 2b. Assumindo que o golfinho desenvolve uma aceleração constante a_G durante a perseguição, seu movimento é considerado uniformemente variado, com aceleração, segundo a equação

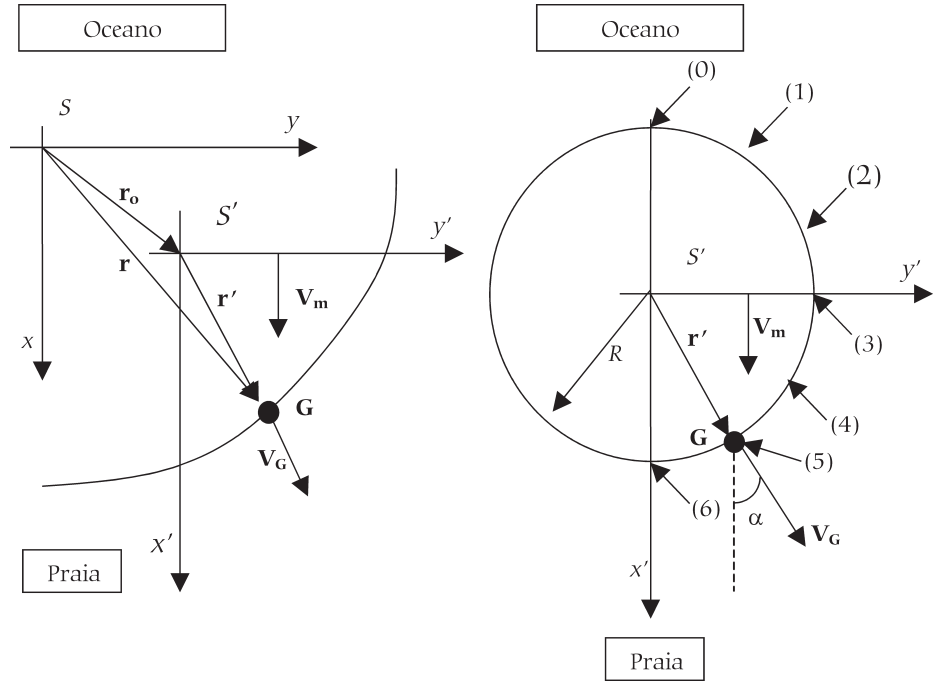


Figura 1. Esquema de orientação para a observação da posição de ataque do golfinho. Direção do corpo do golfinho em relação às ondas. O padrão geral representa todas as posições observadas durante o estudo, e o padrão dos botes e a direção no momento da captura. Os números externos representam a direção do corpo e os internos, em itálico, o número de amostras. As setas indicam a direção do corpo no momento que o animal submerge. Fonte: Ref. [4].

de Torricelli:

$$a_G = \frac{v_G}{2R} \sqrt{(v_G + 2v_m)^2 + 4v_G v_m \cos \alpha - 1}. \quad (2)$$

É importante notar que a quantidade $\cos \alpha - 1 \leq 0$, é igual a zero se $\alpha = 0^\circ$ (direção 6, Fig. 1) e mínima (-2) se $\alpha = 180^\circ$ (direção 0, Fig. 1). Portanto, a maior aceleração do golfinho a_G (Eq. (2)) será na direção e sentido das ondas (sentido da origem para a praia - direção 6, Fig. 1) e mínima no sentido contrário (sentido da origem para o oceano - direção 0, Fig. 1).

Quanto maior a aceleração no momento que antecede o bote, menor o tempo gasto para atingir o ponto de bote após ter percorrido uma distância R (círculo no sistema de referência da Fig. 1b). Assim, podemos afirmar que o tempo para atingir o ponto 6 (Δt_6) é menor do que o tempo para atingir o ponto 5 (Δt_5), e assim sucessivamente, como mostra a desigualdade

$$\Delta t_6 < \Delta t_5 < \Delta t_4 < \Delta t_3 < \Delta t_2 < \Delta t_1 < \Delta t_0. \quad (3)$$

Se considerarmos que o golfinho irá empregar máxima conversão de

energia durante os instantes que antecedem o bote, ou seja, a potência empregada é máxima (P_{\max}) e constante durante todo o percurso independente do ponto de bote, teremos uma relação entre a energia gasta ΔE e o tempo decorrido Δt , como

$$\Delta E = P_{\max} \Delta t. \quad (4)$$

Finalmente, verificamos, pelas Eqs. (3) e (4), a seguinte desigualdade:

$$P_{\max} \Delta t_6 < P_{\max} \Delta t_5 < P_{\max} \Delta t_4 < P_{\max} \Delta t_3 < P_{\max} \Delta t_2 < P_{\max} \Delta t_1 < P_{\max} \Delta t_0,$$

ou

$$\Delta E_6 < \Delta E_5 < \Delta E_4 < \Delta E_3 < \Delta E_2 < \Delta E_1 < \Delta E_0 \quad (5)$$

Portanto, arremessar-se sobre o peixe na posição 6 implica em gastar menor energia.

Pesquisas de Spinelli *et al.* [2] indicam que esse comportamento é aprendido. Os autores categorizaram comportamentos de perseguição de jovens golfinhos a peixes próximos à zona de arrebentação, como uma brincadeira de forrageio, pela não-observação de sucesso na captura, por

animais imaturos. Tanto este comportamento quanto dois outros, designados como brincadeiras locomotoras e *surf*, poderiam representar um treinamento, tanto do ponto de vista motor quanto emocional, para testar seus limites e aperfeiçoar suas habilidades posturais e ações coordenadas.

Considerações finais

Uma última questão, uma das centrais da Ref. [4], seria se há uma fuga do peixe para a praia, ou o mesmo é encurralado pelo golfinho nesta direção. Segundo Valle *et al.* [4], os peixes poderiam estar se deslocando para fugir para a margem, buscando atravessar a linha máxima de capacidade de ataque do golfinho; porém não seria uma estratégia eficiente, uma vez que estes às vezes chegam a expor toda a metade superior do corpo à beira-mar e conseguem retornar [4]. Segundo Spinelli *et al.* [2], em cetáceos, o forrageio tem caráter especializado. Os autores apontam que a descrição de imaturos envolvendo-se em atividades que lembram o forrageio de adultos ou técnicas específicas de forrageio para golfinhos nariz-de-garrafa e orcas, sem resultar em apreensão de presas. No caso das orcas, a literatura registra o encalhamento de

Diferentemente do observado no caso do golfinho, situações de perseguição efetuadas por moscas e besouros registram investidas na direção da presa. Já no caso das libélulas, o ataque é direcionado a um ponto em frente à presa

filhotes acompanhados de adultos na praia, de forma semelhante a adultos quando caçam focas [2].

Os peixes poderiam, ainda, fugir para a margem, uma vez que a inércia das ondas contribuiria para o deslocamento daquele que tem a menor massa, ou seja, o peixe sofre uma mudança do estado estático ao cinético mais rapidamente que o golfinho. Apesar de os peixes terem certo benefício ao se deslocarem para a praia, os golfinhos são favorecidos pelo fato de o deslocamento das águas, abaixo

da superfície, na região de arrebatamento, ocorra no sentido contrário daquelas na superfície, e por isso, no momento do bote, saltem da água se arremessando sobre o peixe trazido pela onda, como

mostra a Fig. 2.

Ainda, segundo Valle *et al.* [4], um outro argumento de que toda a perseguição, desde o momento que o golfinho a inicia até o momento do ataque, faça parte da estratégia de caça do golfinho é a análise da faixa da praia em que a mesma sucede. Na investigação de Valle *et al.* [4], esta faixa iniciava-se próximo à linha de quebra mar.

Diferentemente do observado no caso do golfinho, situações de perseguição efetuadas por moscas e besou-

ros registram investidas na direção da presa. No caso das libélulas, o ataque é direcionado a um ponto em frente à presa (pequenos insetos voadores), predizendo a trajetória desta [6] e indicando respostas visuais seletivas para pequenos movimentos nesses insetos. Estratégia análoga é adotada por jogadores de futebol, por exemplo, para interceptar bolas. Entretanto, para estes esta ação é aprendida, enquanto no caso das libélulas está intrincada em seu sistema neural.

Estimar distâncias e velocidades durante a caça requer um sistema mais complexo, até mesmo a aprendizagem. Nesse sentido, talvez esta seja a resposta do por que Valle *et al.* [4] observaram que golfinhos juvenis não tenham se comportado como os adultos, e Spinelli *et al.* identificaram brincadeira de forrageio [2], uma vez que se espera o aumento da eficiência e a melhoria das estratégias de ataque com o treino e com a idade.

Referências

- [1] Enciclopédia Barsa (Enciclopédia Britânica Editores Ltda, Rio de Janeiro, 2000).
- [2] L.H.P. Spinelli, L.F. do Nascimento e M.E. Yamamoto, Estudos de Psicologia **7**, 161 (2002).
- [3] T.M. Williams, J.E. Haun e W.A. Friedl, The Journal of Experimental Biology **202**, 2739 (1999).
- [4] A.L. do Valle, A. Marletta e F.C.C. Melo, Acta Biol. Paranaense, no prelo.
- [5] R. Resnick, D. Halliday e K.S. Krane, Física 1 (Editora Livros Técnicos e Científicos Ltda, Rio de Janeiro, 1989), 4ªed., p. 69-70.
- [6] R.M. Olberg, A.H. Worthington and K.R. Venator, Journal of Comparative Physiology A **186**, 155 (2000).

Notas

¹Corpo pisciforme, cilíndrico. Por seleção natural, evoluíram para ter um corpo assim, hidrodinâmico.

²Abertura respiratória de orifício único, fechado por uma válvula quando o animal mergulha.

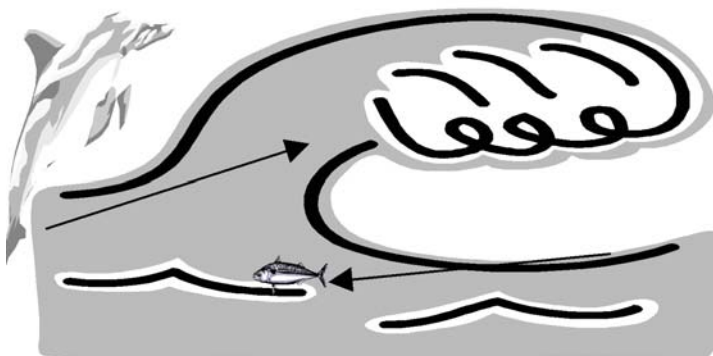
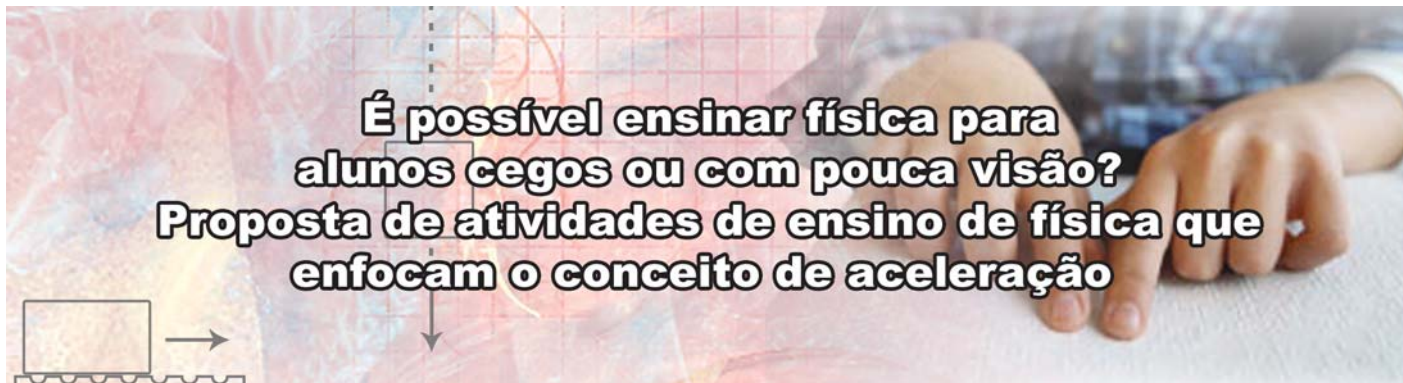


Figura 2. Comportamento das forças de deslocamento da água em uma onda.



.....

Eder Pires de Camargo

Departamento de Física e Química

Faculdade de Engenharia

Universidade Estadual Paulista

Câmpus de Ilha Solteira

Ilha Solteira, SP, Brasil

E-mail: camargoep@dfq.feis.unesp.br

.....

É possível ensinar física para alunos cegos ou com baixa visão? Minha vivência pessoal e meus estudos indicam que sim, principalmente se alguns cuidados forem tomados. Em primeiro lugar, é preciso criar ou adaptar equipamentos que emitam sons ou possam ser tocados e manipulados. Isto é necessário para que o aluno consiga observar o fenômeno físico a ser estudado. Em segundo lugar, o professor deve evitar o uso de gestos, figuras e fórmulas que somente podem ser vistos. Isso significa que o professor deve usar materiais de apoio em braile, gráficos em relevo, calculadora falante e, quando preciso, tocar nas mãos dos alunos para apresentar-lhes alguma explicação.

Para auxiliar os professores de física que possuem em sua sala de aula alunos cegos ou com baixa visão, apresento neste artigo três atividades para o ensino do conceito de aceleração. Quando elaborei essas atividades, procurei tomar o cuidado para que o aluno com deficiência visual participasse ativamente, quer dizer, observasse os fenômenos, as explicações do professor

e, principalmente, apresentasse suas interpretações. Tenho verificado que é muito importante que o aluno com deficiência visual fale aquilo que já sabe e que está aprendendo. Por isso, sugiro aos professores que incentivem seus alunos a falar sobre o assunto trabalhado em classe. Para tanto,

organizem momentos de debates entre os alunos, valorizem suas idéias e interpretações, procurem compreendê-las e procurem se fazer compreendidos. Na seqüência, apresento as atividades.

Atividade 1: o atrito e o conceito de desaceleração

Esta atividade tem por objetivo dar ao aluno com deficiência visual condições de:

a) Compreender o atrito como resultado do contato e do deslizamento de uma superfície sobre outra.

b) Observar tatilmente o comportamento do movimento de blocos de madeira sobre superfícies de diferentes polimentos.

Para atingir os objetivos apresentados, utilize os seguintes materiais:

Kit 1

(a) Três superfícies, sendo uma áspera como uma lixa, outra bem lisa, e uma outra com um polimento intermediário;

(b) Blocos de madeira em formato de paralelepípedo, de mesmas superfícies e diferentes massas. Sugiro usar blocos de madeira com massas de

100 g, 300 g, e 500 g.

Kit 2

(a) Uma superfície de apoio enrugada;

(b) Um objeto com a superfície de apoio enrugada. Tanto a superfície quanto o objeto, devem permitir ao

É importante observar que para ensinar alunos cegos ou com baixa visão o professor deve evitar o uso de gestos, figuras e fórmulas que somente podem ser vistos

O ensino de física para alunos cegos apresenta barreiras naturais quando os métodos tradicionais são utilizados em sala de aula. Este artigo apresenta uma alternativa para estimular o aprendizado de física por parte de alunos cegos.



Foto 1. Blocos de diferentes massas sobre as superfícies.

aluno com deficiência visual observar com o tato suas saliências.

Para construir as superfícies enrugadas, utilizei pequenas pedras. Pode-se, por exemplo, utilizar pedras de asfalto. Cole as pedras nas superfícies como indicado na Foto 2.

Kit 3

(a) Um pedaço de cabo de vassoura de 30 cm de comprimento, fixo perpendicularmente a uma pequena tábua de 30 cm de comprimento por 20 cm de largura. Este objeto representa uma reta normal a uma superfície;

(b) Três pedaços de madeira de 5 cm de largura por 15 cm de comprimento, fixos paralelamente a uma pequena tábua de 30 cm de comprimento por 20 cm de largura. Este objeto representa retas paralelas.



Foto 2. Bloco enrugado sobre a superfície enrugada.

A condução da atividade

Pode-se conduzir a atividade em quatro etapas.

Etapa de experimentação: Nesta etapa, siga os seguintes procedimentos: (a) Separe os alunos em grupos de quatro alunos e distribua para cada grupo o Kit 1; (b) Leia para seus alunos o problema central da atividade; (c) Solicite aos

alunos para que empurrem os diferentes blocos de madeira em diferentes posições sobre as superfícies lisas e ásperas, e para que percebam tatilmente o que ocorre com o movimento desses blocos nas diferentes superfícies.

Questões centrais da atividade (1): Quais são os principais fatores que influenciam o movimento do bloco? O “peso” do objeto é importante? Seu formato é importante? Ambos são importantes? Como podemos descobrir?

Como se pode notar no problema central, utilizei o termo “peso” em vez de “massa”. Tomei esta decisão porque a idéia de peso é mais comum aos alunos do que a de massa. Mas, ao longo da atividade, o professor poderá ir esclarecendo aos alunos os significados desses conceitos físicos.

Etapa de discussão de proble-

mas: Organize um debate entre os grupos para que eles apresentem suas opiniões sobre aquilo que observaram.

Etapa de exposição de modelos: Para explicar aos alunos a relação entre o atrito e a aceleração, faça-os tocar nos materiais do Kit 2. Em seguida, diga a eles que as superfícies dos referidos materiais representam superfícies ao nível atômico ampliadas. Explique-lhes que o atrito surge devido a irregularidades existentes entre as superfícies em contato. Complemente suas explicações lendo aos alunos o texto sobre o atrito.

Etapa de avaliação: Leia aos alunos a questão avaliativa da atividade e ouça suas respostas.

Questão avaliativa: Como uma pessoa, em repouso sobre a superfície gelada e muito lisa de um lago, poderia alcançar a margem?

É importante não considerar as respostas dos alunos como definitivas. Eles poderão estar modificando suas formas de pensar em momentos fora da aula. Para isto, procure fazer anotações sobre pontos principais das respostas dos alunos. Utilize essas anotações para comparar as respostas dos alunos apresentadas na primeira atividade com as respostas apresentadas nas atividades seqüentes. Por exemplo, a atividade 2 aborda novamente o tema da aceleração. Verifique se nesta atividade seus alunos utilizarão conhecimentos elaborados por eles ou apresentados por você na atividade 1.



Foto 3. Representação de uma reta normal à uma superfície.

Atividade 2: queda dos objetos

Esta atividade possui dois objetivos:

(a) Dar condições para que o aluno com deficiência visual ouça e perceba tatilmente a queda de um objeto.

(b) Dar condições para que o aluno com deficiência visual calcule a velocidade e a aceleração de queda do objeto.

Para atingir os objetivos apresentados, construa um artefato para que seus alunos possam notar por meio da audição e do tato a aceleração de um objeto durante sua queda. Sugiro um equipamento elaborado em meu doutorado e que denominei: "Interface sonora para queda dos objetos". Esse equipamento permite que alunos com deficiência visual percebam auditiva e tatilmente a queda de um disco dentro de um tubo. Além disto, o artefato registra em relevo o movimento de queda do disco. Este registro permite aos alunos fazer cálculos de velocidade e aceleração da queda. Para construir o artefato mencionado, utilize os seguintes materiais:

a) Tubo de PVC de 1,8 m de altura com 102 mm de diâmetro interno.

b) Sensores magnéticos para alarme.

c) Um disco metálico e um ímã.

d) Chapa dobrada.

e) Bobina, oscilador e potenciômetro.

f) Fita de papel para marcador de tempo. Utilize um pedaço de fita de papel de 2 m de comprimento com



Foto 4. Representação de retas paralelas.

Texto sobre o atrito

Para iniciarmos o movimento de um bloco que está apoiado sobre uma superfície, sentimos uma certa resistência. Geralmente, assim que o movimento do bloco se inicia, essa resistência diminui. Isto ocorre porque quando fazemos a superfície de um corpo escorregar sobre a de outro, cada corpo exerce sobre o outro uma força paralela às superfícies. Essa força é denominada força de atrito. A força de atrito sobre cada corpo tem sentido oposto ao seu movimento em relação ao outro corpo, e dessa forma as forças de atrito se opõem ao movimento, nunca o favorecem.

Em nosso dia a dia, o atrito exerce uma função fundamental. O início do movimento de um carro, por exemplo, só é possível porque existe uma força na direção e no sentido do movimento do mesmo. O processo é basicamente o seguinte: a queima do combustível no motor provoca o movimento de pistões, que é transmitido para as rodas e, conseqüentemente, para os pneus. Estes, através de uma força de contato, empurram o chão para traz, e o chão, empurra o carro para frente. Sem a força exercida pelo chão, o carro não sairia do lugar e os pneus deslizariam sobre o asfalto. Se não houvesse o atrito, ou seja, se tudo fosse muito liso e escorregadio, caminhadas, corridas, passeios de carro, de ônibus etc., se tornariam quase impraticáveis. Segurar um punção ou mesmo ler um texto em braille seriam tarefas complexas.

O que diferencia uma determinada superfície de outra é a natureza dessa superfície, bem como sua condição de polimento e de lubrificação. Entretanto, como representado no Kit 2, ao nível atômico, mesmo a superfície mais cuidadosamente polida está longe de ser plana. Portanto o atrito depende do grau de polimento dos materiais que formam os objetos e da lubrificação entre eles. Se as superfícies de contato forem polidas e lubrificadas, a intensidade dos contatos nas uniões será menor, diminuindo a força de atrito. Dessa forma, para atenuar os efeitos do atrito, costuma-se colocar lubrificantes entre as duas superfícies, pois, os óleos diminuem os números de uniões entre as mesmas.

marcações em alto relevo de 1 cm. Essas marcações, feitas ao longo de toda fita, têm por objetivo fazer com que o aluno com deficiência visual obtenha as distâncias entre os pontos marcados na fita de papel pelo marcador de tempo.

g) Um fio de nylon de aproximadamente 3 m de comprimento. Esse fio tem por objetivo retirar o disco de dentro do tubo após a queda do mesmo. Além disso, ele pode ser utilizado para controlar com as mãos a velocidade de queda do disco.

Para montar o artefato, perfure o tubo a cada 15 cm e, nesses furos, coloque os sensores

magnéticos para alarme. No topo do tubo, coloque uma chapa dobrada por onde o papel (fita para marcador de tempo) passará durante a queda do disco. Ainda no topo do tubo prenda a bobina com o oscilador e o potenciômetro e ajuste a frequência mais adequada de impacto para a agulha que perfurará o papel enquanto o disco cai dentro do tubo.

Este equipamento permitirá que o aluno com deficiência visual observe auditivamente a queda do objeto dentro do tubo. Permitirá também que se realizem análises quantitativas do movimento de queda.

Para conduzir a atividade, siga os seguintes passos:

(a) Separe os alunos em grupos de no máximo três pessoas. Cada grupo de alunos deverá realizar o experimento de deixar cair o objeto dentro do tubo, ouvindo dessa forma a queda do mesmo. Em seguida, os grupos de posse da fita de papel poderão seguir



Foto 5. Tubo de PVC do artefato: interface sonora para queda dos objetos.

os passos descritos abaixo.

(b) Escolha uma unidade de tempo qualquer. Quando apliquei a atividade em uma sala de aula com alunos com deficiência visual, escolhi como unidade de tempo cinco batidas do vibrador. Denominei cada batida de tique. Assim, minha unidade de tempo ficou sendo “cinco tiques”. Depois, os grupos deverão numerar a fita de papel com intervalos inteiros de unidade de tempo. Para tanto, reforce com a aju-

da de um instrumento pontiagudo as marcas escolhidas e deixadas na fita de papel pelo marcador de tempo. É preciso que se reforce as marcas para que os alunos com deficiência visual consigam percebê-las bem. Se esta atividade for aplicada em uma sala de aula que tenha alunos com e sem deficiência visual, os colegas videntes poderão auxiliar seus colegas com deficiência visual nesta tarefa.

(c) Solicite aos alunos para que, com o auxílio das marcas de 1 cm em relevo, meçam o comprimento de cada intervalo numerado na fita de papel. Aproveite este momento para fazer algumas perguntas a seus alunos: Esses comprimentos são iguais? Por quê? A diferença entre cada intervalo consecutivo é constante? Qual é o significado físico desses comprimentos?

(d) Solicite aos alunos para que calculem a velocidade média em cada intervalo, e o valor da variação da velocidade em cada intervalo consecutivo. Para isto, instrua-os para subtraírem o valor da velocidade média, em um intervalo de tempo, pelo valor da velocidade média no intervalo anterior. Repita este procedimento em vários intervalos e compare os resultados. Neste momento, você pode apresentar aos alunos a questão: A variação da velocidade foi constante?

(e) Solicite aos alunos para que calculem a aceleração em cada intervalo. Para isso, instrua-os a dividir a variação da velocidade pelo intervalo de tempo correspondente a essa variação (cinco tiques).

Para os cálculos, os alunos pode-

rão utilizar uma calculadora falante ou o material em braille. Quando apliquei esta atividade em uma sala de aula com alunos com deficiência visual, notei que eles faziam bem os cálculos e decoravam os valores obtidos. Mas isso pode não acontecer com seus alunos. Se for preciso, ajude-os com os cálculos e com os registros dos valores. Mais uma vez, o professor deve incentivar a participação dos alunos videntes nos cálculos e no registro dos valores, no caso de se trabalhar com uma classe que tenha alunos com e sem deficiência visual. É muito importante o contato entre eles nas atividades em sala de aula.

Avaliação

Depois dos alunos terem realizado as medidas e cálculos anteriormente mencionados, leia para eles a seguinte questão avaliativa:

Como seriam as marcas deixadas por um vibrador em uma fita de papel presa a um objeto que se move com velocidade constante?

Para finalizar, organize um debate entre os alunos sobre a questão avaliativa. Aproveite o debate para observar a compreensão dos alunos sobre o fenômeno gravitacional. Procure observar se as aprendizagens obtidas na atividade (a) foram utilizadas pelos alunos durante este debate. Lembre-se, o processo de aprendizagem não é uniforme, e muitas vezes ocorre em momentos de reflexão fora da sala de aula. Proporcione problemas interessantes para que seus alunos pensem durante a semana ou entre uma



Foto 6. Disco metálico preso à fita de papel.

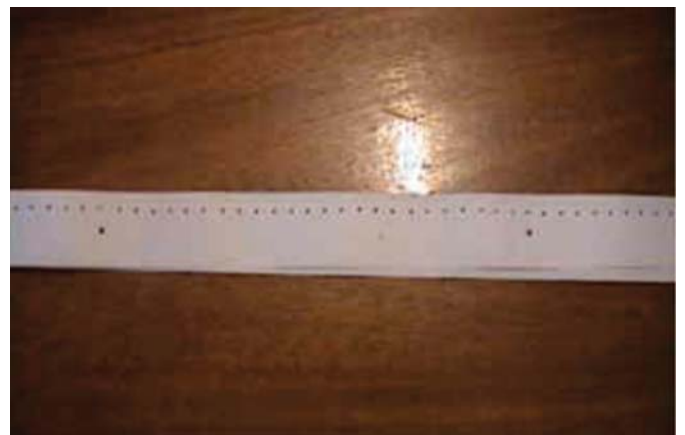


Foto 7. Fita de papel com as marcas superiores e as marcas feitas pelo vibrador (marcas centrais).

atividade e outra. Isto é algo muito importante para a qualidade da aprendizagem de seus alunos.

Atividade 3: problemas com muitas respostas - posição de encontro

Esta atividade tem por objetivo trabalhar um problema com muitas possibilidades de respostas. Este problema apresenta um evento sonoro que descreve uma possível colisão entre um trem e um carro. Como o professor vai notar, as soluções do problema exigem a análise do fenômeno físico envolvido, a formulação de hipóteses e a realização de várias tentativas e aproximações. Utilize os seguintes materiais durante a realização desta atividade:

a) Rádio para tocar CD ou fita.

b) A gravação do evento sonoro (em CD ou fita cassete).

Evento sonoro: Um carro se aproxima de uma ferrovia. O motorista nota por meio do som do apito e das rodas do trem o movimento do mesmo. Conseguirá o motorista do carro frear o veículo para que não haja colisão? Este evento sonoro foi gravado em um estúdio e está disponível para *download* [1].

Para conduzir esta atividade, siga

os procedimentos descritos:

a) Separe os alunos em grupos de quatro e apresente-lhes a gravação do evento sonoro.

b) Proporcione aos alunos um momento de reflexão e discussão sobre a questão do evento: “Conseguirá o motorista do carro frear o veículo para que não haja colisão?”

c) Proporcione um momento para o debate entre os grupos.

Como esta atividade apresenta um problema com muitas possibilidades de respostas para uma possível colisão entre um carro e um trem, ela pode proporcionar aos alunos condições para a realização de um estudo qualitativo acerca da posição de encontro de veículos. Incentive seus alunos a apresentar respostas sobre o evento sonoro. Valorize as respostas de todos os alunos. Organize essas respostas; se for o caso, destaque as diferenças entre as respostas, promova momentos de reflexão entre os alunos. Após um certo tempo de discussão faça sínteses, inclusive para chegar a situações físicas mais específicas como o movimento com aceleração constante.

Se houver dúvidas sobre algum ponto das atividades, não deixe de entrar em contato comigo pelo e-mail camargoep@dfq.feis.unesp.br.

Quando apliquei essas atividades em uma sala de aula com oito alunos cegos e um com baixa visão, obtive bons resultados. Os alunos discutiram os fenômenos físicos do atrito e da aceleração e demonstraram ter aprendido a maioria dos conceitos trabalhados.

Utilize as atividades em sala de aula que tenham alunos com e sem deficiência visual. Quando fizer isso, explore as potencialidades auditivas e táteis de todos os alunos. Tenho notado que as percepções que não são visuais são muito importantes para alunos videntes. Dessa forma, encare seu aluno com deficiência visual como um aluno normal de sua sala de aula. Valorize todas as percepções, isso colocará todos os alunos em situação de igualdade em relação ao estudo de um determinado fenômeno físico. Por isso, coragem e boa sorte!

Agradecimento

Agradeço o apoio da FAPESP.

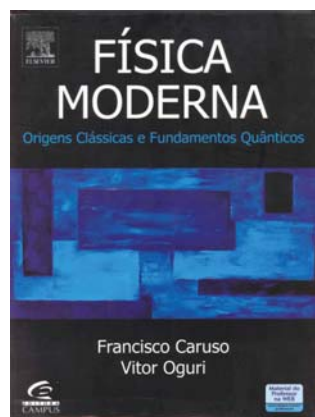
Referência

- [1] <http://www.fc.unesp.br/pos/ciclos/index.htm> (clique em *downloads* e depois no arquivo *audio9.mp3*).

Na Prateleira

Física moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos

Francisco Caruso e Vitor Oguri, Editora Campus/Elsevier, Rio de Janeiro (2006)



Portentoso livro didático que aborda os conceitos da física do século XX com forte embasamento histórico. Segundo Roberto Salmeron, físico emérito do CERN, trata-se de “uma obra que estava faltando na biblioteca científica em língua portuguesa”. Além de excelente livro-texto para as disciplinas de física moderna, constitui-se em uma referência indispensável para

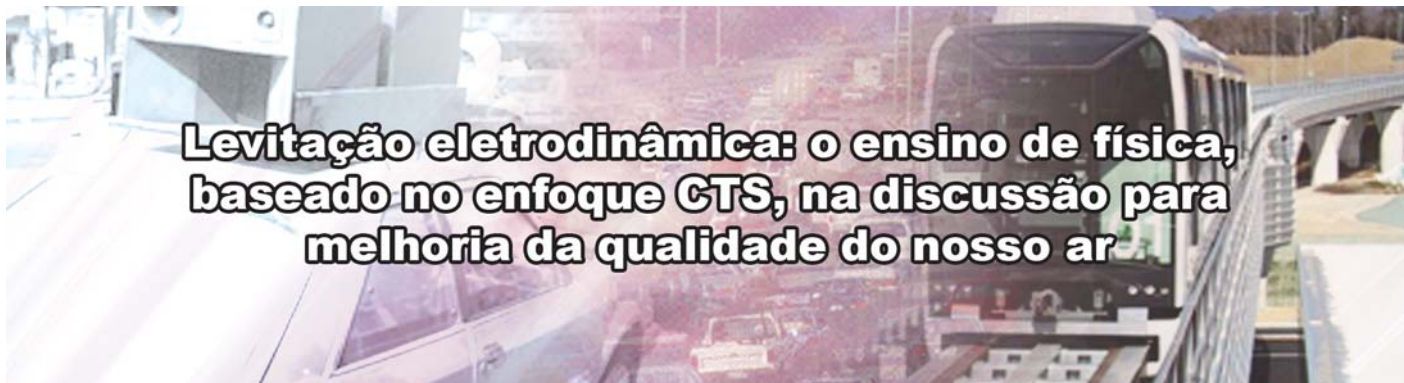
todo professor de física do ensino médio.

Física moderna para iniciados, interessados e aficionados

Ivan S. Oliveira, Editora Livraria da Física, São Paulo (2005)



Um interessante livro destinado aos alunos e professores do ensino médio, alunos dos cursos de graduação da área de ciências exatas cobrindo tópicos que vão da teoria da relatividade especial e geral à física de partículas. O autor adota um estilo bem-humorado e informal, o torna este livro mais atraente para o aluno.



Levitação eletrodinâmica: o ensino de física, baseado no enfoque CTS, na discussão para melhoria da qualidade do nosso ar

Introdução

Em 1950, a população mundial era de 2,5 bilhões, em 2000 cresceu para 6 bilhões e estima-se que em 2030 o número de habitantes do planeta chegue a 8 bilhões. Estes números, que impressionam, significam uma demanda cada vez maior por transporte, seja para movimentar bens ou pessoas. Evidentemente que esta atividade irá gerar uma série de impactos no meio ambiente [1].

De acordo com o capítulo 7 da Agenda 21 nacional,¹ o transporte responde por cerca de 30% do consumo comercial de energia e por cerca de 60% do consumo total mundial de combustíveis líquidos. No Brasil, a rápida motorização e a insuficiência de investimentos em planejamento de transporte, manejo e infra-estrutura do tráfego estão criando

problemas cada vez mais graves, causando acidentes, ruído, congestionamento e poluição atmosférica. Esta poluição provoca danos à fauna, flora e biosfera, prejuízos à saúde, e perda de produtividade, semelhante a países desenvolvidos [1-3].

Assim fica a questão: Será que o cidadão possui a formação suficiente e necessária para avaliar as “soluções” propostas pelos governantes, tal como construção de novos viadutos, túneis, implementação de sistemas de integração, a inserção de novas tecnolo-

gias; e avaliar se estas medidas irão de fato solucionar a questão da degradação ambiental, ou apenas irão suavizá-las?

O trabalho proposto é motivado e se desenvolve a partir do surgimento de novas tecnologias para os meios de transportes, em especial o transporte de massa, que possui o objetivo da não poluição ou sua mitigação. Desta forma, relaciona a questão da poluição atmosférica pela emissão de gases dos veículos automotores e avaliam-se quais os meios de transporte mais inteligentes, quando se objetiva preservar a atmosfera. Também visa compreender as novas tecnologias e terminologias que surgem geralmente

Será que o cidadão possui a formação suficiente e necessária para avaliar as “soluções” propostas pelos governantes e avaliar se estas medidas irão de fato solucionar a questão da degradação ambiental, ou apenas irão suavizá-las?

acompanhadas das inovações tecnológicas, como por exemplo, o trem MAGLEV (*magnetic levitation*). Para esta compreensão, serão abordados conteúdos de eletromagnetismo para o ensino médio com a

utilização de um protótipo experimental para a levitação eletrodinâmica [4].

Optou-se por um assunto específico do campo do eletromagnetismo e do meio ambiente sem, no entanto, esgotar os conteúdos de física ou meio ambiente. Será proposta uma das possibilidades de abordagem para tais conteúdos.

Com a utilização do protótipo experimental será possível direcionar o debate de maneira a relacionar as características dos atuais trens para

.....
Anderson Gomes de Paula

E-mail: prof.agp@gmail.com

Deise Miranda Vianna

E-mail: deisemv@if.ufrj.br

Instituto de Física

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

.....

Este artigo aborda parte do conteúdo do magnetismo para o ensino médio com ênfase em ciência, tecnologia e sociedade (CTS). Em particular será tratado o fenômeno da levitação eletrodinâmica que fundamentado na indução magnética fornecerá suporte científico necessário para a compreensão de tecnologias correlatas. A motivação desta proposta é a poluição do ar causada pela utilização de algumas tecnologias, como, por exemplo, os motores a explosão utilizados nos meios de transporte. Com a orientação do professor de física, propõe-se que os alunos correlacionem as várias causas da poluição do ar, com ênfase nas originadas pelos meios de transporte, possibilitando a discussão sobre a tecnologia de trens de levitação.

o transporte de massa, e os trens de levitação. Será possível ainda abordar conceitos de física tais como interação a distância, campo magnético, corrente de Foucault, lei de Faraday, lei de Lenz, ação e reação e energia, entre outros.

Ainda que abordando apenas um pequeno tópico no ensino médio, pretende-se que o aluno possa compreender tecnologias correlatas e avaliar questões que o afetem diretamente, tal como as ambientais. Em resumo, o projeto busca, identificando com os princípios do enfoque Ciência Tecnologia e Sociedade - CTS, trazer para as aulas de física, discussões que favoreçam o desenvolvimento de uma alfabetização científica, tecnológica e social mínima, que ajude o aluno a se desenvolver e criar condições efetivas para que ele possa participar como cidadão crítico, e não como mero espectador, de discussões sobre assuntos ligados aos setores de transporte e meio ambiente.

Os problemas ambientais e o ensino de física

Este projeto não só envolve o estudo de diversos conceitos físicos, como promove a associação destes conceitos com o cotidiano, e com a problemática econômica e ambiental de forma contextualizada, uma vez que permite discutir conteúdos científicos e tecnológicos associados a questões como combustíveis alternativos menos poluentes que os combustíveis fósseis, ou ainda alternativas de otimização dos meios de transporte. Desta maneira os custos ambientais poderiam ser avaliados e incorporados no planejamento do setor de transportes, penalizando aqueles modos ou interferências mais agressivas ao meio ambiente [1, 3, 4].

A relação entre educação e cidadania, encontrada nos documentos oficiais e nas pesquisas didáticas, determina a influência no ideário pedagógico e deve estar presente na prática pedagógica de nossos professores.

Para Menezes [5], a partir da Lei de Diretrizes e Bases de 1996 - LDB/1996 [6], houve uma definição legal para um novo ensino médio. Este novo ensino deve desenvolver competências e habilidades para a cidadania, para a continuidade do aprendizado e do trabalho sem pretender-se profissionalizar ou simplesmente preparar para o ensino superior.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio - PCNEM [7], principal referência curricular no território brasileiro, incorporam essa tendência. No documento, está explicitado que as transformações que ocorrem no Brasil, em função da consolidação do regime democrático, a inserção de novas tecnologias e demais mudanças que impactam o cenário contemporâneo "exigem que a escola possibilite aos alunos integrar-se ao mundo contemporâneo nas dimensões fundamentais da cidadania e do trabalho".

Segundo Ricardo [8], a LDB/1996 aponta para a necessidade de uma reforma em todos os níveis educacionais, que se inspira, em parte, nas visíveis transformações por que passa a sociedade contemporânea. No entanto Kawamura e Hosoume [9] alertam que a implementação das novas diretrizes que estão sendo propostas, ou seja, sua tradução em práticas escolares concretas não ocorrerá por decreto, nem ocorrerá de forma direta.

Desta forma a implementação destas diretrizes depende do trabalho de incontáveis professores.

Nesse sentido, os PCNEM procuram oferecer subsídios para os professores implementarem as reformas pretendidas. Estes são divididos por área de conhecimento a fim de facilitar, conforme as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio [10], um trabalho interdisciplinar [8].

A LDB/1996 aponta para a necessidade de uma reforma em todos os níveis educacionais, que se inspira, em parte, nas visíveis transformações por que passa a sociedade contemporânea

Temos ainda nas Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais de 2002 - PCN+ [4], material dirigido aos professores, em que se busca aprofundar, através de exemplos e estratégias de trabalho, a proposta inicial que foi apresentada nos PCNEM.

Considerando o enfoque CTS, o ensino de física pode estar relacionado a

um dos aspectos do cotidiano do aluno, por exemplo, a poluição do ar, que, a seguir, destacamos algumas questões relacionadas.

A poluição do ar no perímetro urbano das grandes cidades é resultado, principalmente, da queima de combustíveis fósseis como, por exemplo, carvão mineral e derivados do petróleo (gasolina e diesel). A queima destes produtos tem lançado uma grande quantidade de monóxido e dióxido de carbono na atmosfera. Tais combustíveis são responsáveis pela geração de energia que alimenta os setores industriais, elétricos e de transportes, de grande parte das economias do mundo [3, 11, 12].

Para diminuir este problema, temos como exemplo a cidade de São Paulo, que

Em 1996, a restrição à circulação de veículos foi estabelecida por lei, vigorando sempre nos períodos considerados necessários pela SMA e CETESB. O rodízio de circulação de veículos, que vigorou de maio a setembro de 1998, evitou o lançamento de 55 toneladas de CO na atmosfera [11].

A poluição também tem prejudicado os ecossistemas e o patrimônio histórico e cultural em geral. Fruto desta poluição, a chuva ácida mata plantas, animais e vai corroendo, com o tempo, monumentos históricos. Exemplo disto está a Acrópole de Atenas que teve de passar por um processo de restauração, pois a milenar construção estava sofrendo com a poluição da capital grega.

O clima também é afetado pela

poluição do ar, a intensificação do efeito estufa está aumentando a temperatura em nosso planeta. Isto ocorre por que os gases poluentes formam uma camada de poluição na atmosfera, bloqueando a dissipação do calor. Desta forma, o calor fica concentrado na atmosfera, provocando mudanças climáticas [1].

Em vista disto, fica evidente que para preservar o meio ambiente, saber avaliar os impactos de novas tecnologias é fundamental.

Apresentação da proposta de trabalho didático

Os conteúdos de física e meio ambiente, ao serem correlacionados através do uso da tecnologia dos meios de transporte e orientados pelo professor de física, fornecerão ao aluno acesso a uma compreensão conceitual e formal consistente e essencial para sua cultura, tornando seu desenvolvimento intelectual crítico, reflexivo e questionador, de maneira que ele poderá exercer plenamente sua cidadania [4].

Cabe ainda alertarmos que alguns conceitos de física e questões ambientais, citados ao longo do trabalho, serão considerados já compreendidos pelos educandos em etapas anteriores do curso de ensino médio. Caso contrário, dever-se-ia elaborar um trabalho que abrangeria grande parte do eletromagnetismo, da química, biologia e geografia. Sempre que tais considerações se fizerem necessárias, as indicaremos por um asterisco.

Faz-se necessário que o professor possua conhecimento e entendimento dos principais prejuízos ocasionados pela poluição do ar, tais como o buraco na camada de ozônio, o aumento do efeito estufa, a chuva ácida, inversão térmica, algumas alergias, doenças respiratórias e ainda tome conhecimento de assuntos polêmicos, por exemplo o aquecimento global. Estes fenômenos podem ser encon-

trados em sítios da internet e livros. Acreditamos que o professor de física possa compreendê-los tanto quanto

o necessite para o desenvolvimento deste trabalho e quando não, possa solicitar a inferência ou cooperação do profissional adequado.

O trabalho será apresentado em unidades didáticas, assim como a parte experimental do projeto.

Para um desenvolvimento adequado desta proposta, é necessário que o professor possua conhecimento e entendimento dos principais prejuízos ocasionados pela poluição do ar, como o buraco na camada de ozônio, o aumento do efeito estufa, a chuva ácida, inversão térmica, algumas alergias e doenças respiratórias

Unidade 1: a questão ambiental

1 - Em princípio o professor deverá questionar os alunos sobre quais problemas são mais comuns em grandes cidades, São Paulo e Rio de Janeiro por exemplo, advindos da poluição do ar. Evidentemente haverá vários, tais como chuva ácida, efeito estufa, inversão térmica, problemas respiratórios e de alergia. Caso contrário, o professor poderá optar por citar os principais, como efeito estufa e inversão térmica e explicá-los.

2 - O professor deverá selecionar alguns, por exemplo, o efeito estufa, e pedir que os alunos expliquem tais fenômenos. O professor pode intervir, se necessário, para orientar as idéias, validando-as ou não.

3 - Após as discussões anteriores procure indicar as fontes responsáveis pelos efeitos da poluição do ar.

4 - Evidentemente a emissão de gases estará em pauta. Este momento é oportuno para se questionar: Quais são os principais responsáveis pela emissão destes gases?

5 - Identificados as indústrias e os veículos como os principais responsáveis pela emissão dos poluentes, surge a questão: É possível extinguir ou suavizar a emissão destes gases?

6 - Que medidas seriam necessárias? Citar exemplos de medidas que

são tomadas em relação à indústria. E quais medidas são tomadas em relação aos veículos?

7 - Enfatizando a poluição veicular, quais os meios de transporte menos poluentes? Quais as vantagens e desvantagens de cada um deles?

Entre os meios de transporte que devem ser citados, o trem deverá receber uma abordagem especial pelo professor, caso os alunos não o evidenciem como um dos mais vantajosos meios de transporte de massa. Esta especial atenção aos trens se deve ao fato de que uma nova tecnologia vem sendo implementada neste meio de transporte e poucas pessoas têm conhecimento para se referir a ela ou fornecer algum esclarecimento sobre a mesma. Segundo Ostermann e Pureur [13], uma das mais charmosas aplicações da supercondutividade são os veículos levitados magneticamente, em que se pode citar o MAGLEV - um trem de levitação que opera experimentalmente no Japão.

8 - Os trens seriam uma boa opção para diminuir a emissão de gases? Existem novas tecnologias para este meio de transporte? Quais?

9 - O que são trens de levitação?

Unidade 2: a indução eletromagnética

10 - Neste momento o professor apresentará o protótipo experimental aos alunos, conforme descrito no item seguinte, e pedirá para que eles identifiquem o que compõe o protótipo. Somente após a identificação dos elementos constituintes, o professor ligará o mesmo.

11 - Chamando a atenção dos alunos para que inicialmente o conjunto ímã-forma permanece em contato, e que, após a forma adquirir movimento, o ímã levita, e é possível formular a seguinte questão: Por que o ímã levita?

A partir deste momento o professor poderá discutir e esclarecer o fenômeno básico da levitação magnética empregada no chamado MAGLEV, se

Os conteúdos de física e meio ambiente, ao serem correlacionados através do uso da tecnologia dos meios de transporte e orientados pelo professor de física, fornecerão ao aluno acesso a uma compreensão conceitual e formal consistente e essencial para sua cultura

fundamentando na *repulsão magnética por dois ímãs**. Cabe ainda trabalhar os conceitos de *interação a distância** e *linhas de campo magnético**. Após a recordação destes conceitos, deve-se propor aos alunos se é possível relacionar tais conceitos com o fenômeno da levitação eletrodinâmica. Após as discussões anteriores, pode-se trabalhar com as seguintes questões:

12 - Qual a natureza destas forças?

13 - A força exercida sobre o ímã é igual à força exercida na forma?

14 - Por que não há levitação quando não há movimento?

15 - O que deixa de existir na interação do ímã com a forma?

O aparato experimental

O protótipo experimental é simples, de baixo custo, de fácil montagem e traslado. Ele permite ao aluno a interação direta, familiarizando-o com os vários componentes constituintes do experimento. Este é um aspecto de grande importância, pois ao identificar os elementos do aparato, o aluno terá um ponto de partida para as proposições posteriores ao fenômeno de levitação, que se verificará após o funcionamento do experimento.

Ele é constituído de uma forma de alumínio (forma de bolo), parafusos, ímã, fios de nylon, uma caixa de madeira e um motor de máquina de costura. A representação abaixo (Fig. 1) indica os componentes deste protótipo.

O ímã fixado pelos fios permite, por exemplo, que o aluno o mova para cima e para baixo, possibilitando a per-

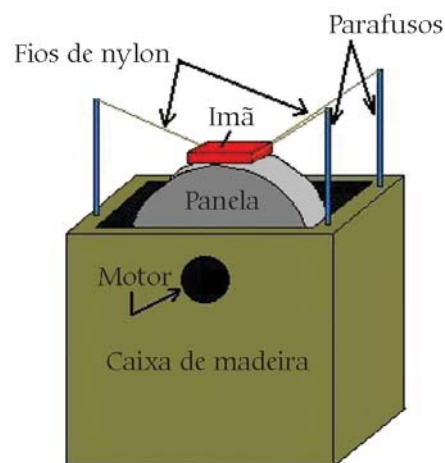


Figura 1. Esquema do aparato.



Figura 2. Vista do aparato desligado.

cepção de uma força de repulsão. Pode-se ainda desligar e ligar o motor e observar se ocorre alguma mudança.

O experimento real é apresentado abaixo, em seqüência, isto é, inicialmente o aparelho está desligado (Fig. 2). Observe que o ímã está totalmente apoiado na forma de alumínio.

Ao se iniciar o movimento da forma, o ímã começa a ser repellido (Fig. 3). Esta repulsão é gradual e tende a aumentar à medida que a forma vai adquirindo maior velocidade.

Na Fig. 4, a forma alcançou sua velocidade máxima e por conseguinte o ímã sofre a repulsão máxima.

Além do caráter ilustrativo do experimento, ele possui também um caráter interativo, pois o aluno pode

tocar no ímã e perceber a força de repulsão, além de movê-lo verticalmente e verificar se ocorre alguma mudança.

Este aparato experimental proporciona a visualização da levitação eletrodinâmica. Esta ocorre devido ao movimento relativo de ímãs nas proximidades de placas metálicas condutoras de materiais não ferromagnéticos, por exemplo, o cobre e o alumínio, que faz surgir correntes induzidas ou correntes de Foucault. Estas correntes induzidas geram um campo magnético que se opõe à variação do fluxo de campo magnético que as induziu, que neste caso é proveniente dos ímãs (Fig. 5). Devido a esta interação surge uma força resultante sobre o ímã. Uma das componentes



Figura 3. Experimento em funcionamento.

desta força repulsiva é responsável pela levitação do ímã, a outra componente é contrária ao movimento da forma de alumínio, conforme apresenta a Fig. 6.



Figura 4. Repulsão máxima.

A compreensão deste fenômeno é dada a partir das leis de Lenz e de Faraday. A primeira justifica o surgimento de um campo magnético oposto ao campo magnético do ímã, e a segunda

o surgimento da indução que gera forças eletromotrices circulares na superfície da forma metálica.

Conclusão

Nosso projeto possui como objetivo central possibilitar ao professor, de acordo com a LDB/96 e orientações dos PCN's e PCN+, uma abordagem para trabalhar com conteúdos do eletromagnetismo e suas aplicações tecnológicas no dia a dia, preferencialmente com alunos da terceira série do ensino médio. Procuramos dar ênfase às questões fenomenológicas, experimentais e reflexivas que se entrelaçam com as novas tecnologias, a ciência e o meio ambiente, sem nos preocuparmos com o rigor matemático.

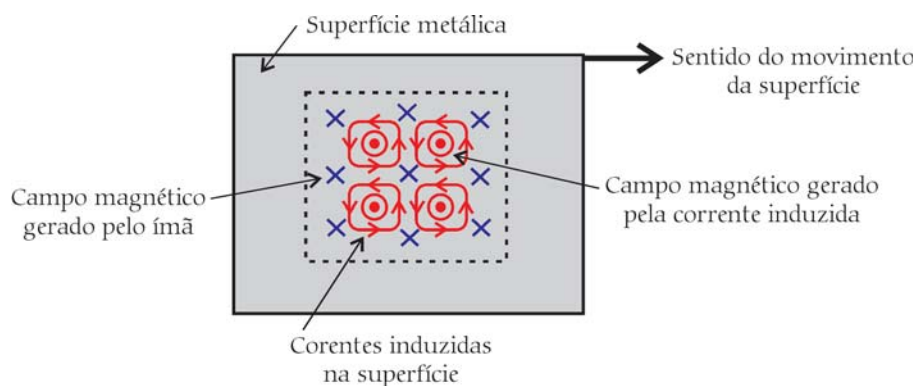


Figura 5. Campos e correntes durante a repulsão máxima.

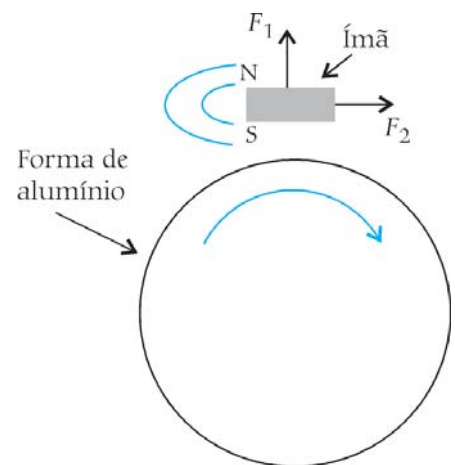


Figura 6. Forças no ímã durante a repulsão máxima

Bibliografia

- [1] S.K. Ribeiro, A.M. Araújo, F. Scatolini, M.T. Fernandes e N.R. Reis Filho, *Transporte mais Limpo* (Editora da COPPE, Rio de Janeiro, 2003), 208 p.
- [2] Brasil, Ministério das relações exteriores. Agenda 21. disponível em: <http://www.mre.gov.br/cdbrasil/itamaraty/web/port/relext/mre/agintern/meioamb/index.htm> Acesso em 8/7/2005.
- [3] R.A. Dias e J.A.P. Balestieri, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **23**, 7 (2006).
- [4] Brasil, Ministério da Educação e Cultura - Secretaria de Educação Básica. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (2002). Disponível em <http://www.portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em 1/7/2005.
- [5] L.C de Menezes, *Física na Escola* **1**(1), 5 (2000).
- [6] Brasil, Ministério da Educação e Cultura - Secretaria de Educação Básica. Lei de Diretrizes e Bases do Ensino Médio (1996). Disponível em <http://www.mec.gov.br/seb/pdf/LDB.pdf>. Acesso em 1/7/2005.
- [7] Brasil, Ministério da Educação e Cultura - Secretaria de Educação Básica. Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (1998). Disponível em <http://www.portal.mec.gov.br/seb/index.php?option=content&task=view&id=265&Itemid=255>. Acesso em 1/7/2005.
- [8] E.C. Ricardo, *Física na Escola* **4**(1), 8 (2003).
- [9] M.R.D. Kawamura e Y. Hosoume, *Física na Escola* **4**(2), 22 (2003).
- [10] Brasil, Ministério da Educação e Cultura - Secretaria de Educação Básica. Diretrizes Curriculares nacionais para o Ensino Médio (1998). Disponível em <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/PCB1598.pdf>. Acesso em 1/7/2005.
- [11] P.R. Russo, *A Distribuição das Concentrações de Partículas em Suspensão na Atmosfera da Porção Centro-Oriental do Município do Rio de Janeiro: Considerações Preliminares sobre a Correlação entre Saúde Pública e Poluição do Ar*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002, p. 27-55.
- [12] P.N. Neto, *Efeito Estufa*. Disponível em http://www.sua_pesquisa.com/efeitoestufa/ Acesso em 8/7/2005.
- [13] F. Ostermann e P. Pureur, *Supercondutividade: Temas Atuais de Física* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2005), 78 p.

Nota

¹“Agenda 21” é um programa de ação para viabilizar a adoção do desenvolvimento sustentável e ambientalmente racional em todos os países. As indicações deste documento podem ser encontradas nos sítios indicados na Ref. [2].



Eric Rogers e o ensino de física moderna

Alexandre Medeiros

Departamento de Física
Universidade Federal Rural de
Pernambuco
Recife, PE, Brasil
E-mail: med@hotlink.com.br

Eric Rogers apreciava brinquedos curiosos, tendo inclusive apresentado um dos mais interessantes a Einstein na ocasião dos seus setenta anos e que estava relacionado com o *Princípio da Equivalência* [1]. Ele tinha também uma paixão especial pela história da ciência e pelo seu enorme potencial pedagógico. Seus escritos retratam bem esta faceta, principalmente a sua narrativa apaixonante do enlace fecundo entre as histórias da astronomia e da física. Rogers foi pioneiro de uma tendência refinada no ensino da física que pode ser denominada de *ensino para a compreensão*. Era algo que envolvia um tratamento holístico desta ciência, lidando com experimentos, com aplicações, com muitas informações e relatos históricos e, sobretudo, com maravilhosas discussões conceituais; discussões que por vezes enfocavam com propriedade e clareza incomuns sérios problemas epistemológicos presentes na produção do conhecimento científico. A discussão que Rogers faz [2], por exemplo, em *Physics for the Inquiring Mind*, do fenômeno da capilaridade e do conceito de tensão superficial são magistrais. Ele coloca em cheque até mesmo certas sutilezas da linguagem utilizada e deixa clara a sua posição de que *saber dar nomes novos às coisas é algo bem diferente de compreendê-las*.

No final dos anos 1950 e no início dos anos 1960, em pleno cenário da Guerra Fria, apareceram dois grandes projetos curriculares de ensino de física que exerceram uma influência internacional: o PSSC, americano, e o Nuffield, inglês. Eram projetos revolucionários em vários sentidos e em am-

bos a presença de Rogers foi marcante. Do Nuffield, que foi a resposta inglesa ao PSSC, Rogers foi realmente o seu personagem central. Análises educacionais mais recentes têm creditado a estes meritórios projetos uma certa característica megalomaníaca e um certo viés indutivista em suas formas de ver a produção do conhecimento. Boa parte dessas críticas de fato são válidas, mas isso não tira o mérito de tais projetos, apenas os situa historicamente como fenômenos bem datados.

Se por um lado as propostas pedagógicas do PSSC e do Nuffield precisam ser tidas como meritórias, mas necessariamente datadas, a preocupação e a atitude de Eric Rogers em relação ao ensino da física, por outro lado, transcende facilmente o seu próprio

Saber dar nomes novos às coisas é algo bem diferente de compreendê-las
Eric Rogers

tempo. Rogers se revela ainda atual e brilhante em muitas de suas inúmeras contribuições e reflexões pedagógicas, como tentaremos mostrar em seguida com um breve exemplo.

Para ilustrarmos, ainda que de forma breve e episódica, a qualidade da contribuição de Rogers ao ensino da física, selecionamos uma defesa apaixonada, carregada de uma fina ironia, da necessidade crescente de se ensinar conteúdos de física moderna na escola. Ela é a transcrição do discurso de abertura feito por Rogers na ocasião da Conferência Internacional sobre o ensino da física realizada em Copenhague em 1969.

Para que se perceba a qualidade e a profundidade da contribuição de Eric Rogers ao ensino da física, nada certamente pode substituir a prazerosa leitura de sua maravilhosa obra. Nem

Este artigo enfoca a atuação de Eric Rogers, um dos melhores professores de física do século XX e grande entusiasta do ensino de ciências.

mesmo deleitar-se com a leitura do excelente livro escrito em sua homenagem, em 1992, coordenado por Brenda Jennison e Jon Ogborn [3], e com a participação de uma plêiade de nomes importantes no cenário mundial do ensino da física no século XX, dentre eles os dos professores Paul Black, Brian Chapman, Maurice Ebbison, Poul Thomsen, Anthony French, John Lewis, Joan Solomon e muitos outros, chega a ser tão interessante quanto sua obra.

Apenas de passagem, esse livro conta ainda com as contribuições dos professores brasileiros Marcos Elia, Rachel Gevertz, Ana Tereza Filipecki Martins e da mais brasileira de todas as argentinas,

a professora Susana de Souza Barros, que teve o prazer de conhecer o professor Rogers quando ela trabalhou em Princeton.

Desta forma, portanto, o pequeno exemplo que se segue tem apenas a intenção de prestar uma singela mas justa e merecida homenagem ao professor Eric Rogers, despertando talvez a curiosidade dos leitores desta revista para buscarem um conhecimento mais extenso e profundo de sua belíssima obra dedicada ao ensino da física.

Uma fábula sobre a necessidade do ensino da física moderna

Muito tem se discutido nos últimos anos sobre a necessidade da introdução da física moderna no ensino médio. Os argumentos daqueles que defendem tal ensino têm enfocado, sobretudo, a necessidade de se passar para os estudantes uma imagem mais próxima do que se faz atualmente em física e que sirva ao mesmo tempo para compreender o mundo em que vivemos. Os argumentos daqueles que têm se colocado contra esta introdução têm variado desde a dificuldade causada pelo caráter abstrato dos conceitos na física moderna, da profunda matematização de seus conteúdos até a situação vexatória em que se encontra atualmente o próprio ensino da física clássica nas escolas. Estes três argumentos contrários parecem fáceis de ser refutados. Em primeiro lugar, há de se admitir, sem sombra de dúvida, o caráter abstrato

dos conceitos da física moderna. Esta mesma abstração e corte com o senso comum está, entretanto, já presente na física clássica, mas não é tão facilmente percebida. O clássico conceito de inércia, por exemplo, é algo que violenta o senso comum do aprendiz e nem por isso deixamos de ensiná-lo no curso médio. Na verdade, alguns professores parecem simplesmente estar já tão acostumados com certas abstrações da física clássica que as tomam como a mais

pura expressão da realidade. O segundo argumento também é simples de ser refutado, pois aquilo que se pretende introduzir da física moderna no ensino médio não deve ser a sua forte matematização, mas sim o caráter

revolucionário de seus conceitos e de suas leis. E isto, pode ser feito de forma introdutória com bastante parcimônia e responsabilidade, dando ênfase à discussão, por exemplo, das novas idéias sobre tempo, espaço e matéria contidas na relatividade restrita e cuja matemática não vai além da álgebra elementar. Do mesmo modo, a questão da quantização da energia pode ser discutida no contexto interpretativo mais simples do efeito fotoelétrico, evitando-se as complexidades inerentes ao tratamento matemático usualmente dispensado no estudo da radiação de corpo negro. O terceiro argumento contrário à introdução da física moderna no ensino médio é ainda mais simples de ser refutado. A alegação de

que o ensino atual da física clássica vai mal é certamente correta, mas extrair-se daí a alegação de que a física moderna por isso não deveria ser ensinada é um grave equívoco. O ensino clássico

da física vai mal, dentre outros motivos, pelo excessivo formalismo de que é revestido, e isso precisa certamente ser corrigido. Mas a introdução de conteúdos selecionados da física moderna não implica em aumentar este formalismo inconseqüente. O que é necessário é que o ensino da física de um modo geral, clássica ou moderna, seja pauta-

do pelo bom senso, por uma adequação dos conteúdos lecionados ao nível de compreensão dos alunos. E pode parecer surpreendente como se pode discutir conteúdos modernos lado a lado com conteúdos clássicos já consagrados. Por que lecionar relatividade apenas ao final de todo o curso? Por acaso, pretendemos retirar a relatividade dos conflitos surgidos entre a mecânica e o eletromagnetismo? Isto é possível e desejável no ensino de relatividade na universidade, mas certamente não é a abordagem mais conveniente no ensino médio. Por que não introduzir a relatividade desde as primeiras aulas, quando se fala de tempo, espaço e de referencial? Por que não utilizar em lugar do experimento de Michelson, de difícil compreensão para o iniciante, certos experimentos em pensamento como o do “trem de Einstein”? Esta não é uma discussão simples e rápida, mas é preciso que se diga com clareza que boa parte dos argumentos daqueles que se colocam contra o ensino da física moderna no curso médio apenas escondem o medo de terem de lecionar determinados conteúdos com os quais não estão familiarizados e que por motivos variados preferem não estudar. Esta atitude, porém, já adentra no terreno da responsabilidade social do papel do professor de física que ao recusar-se a lecionar conteúdos mais modernos aos seus estudantes nega aos mesmos a possibilidade de que eles interpretem criticamente o mundo de hoje, um mundo repleto de ciência e de tecnologia. Muito já se escreveu sobre este debate, mas poucos ousaram denunciar esta atitude de conservadorismo pedagógico presente nas

dificuldades de introdução do ensino da física moderna na escola média. A metáfora do hipotético viajante que tendo entrado em uma “máquina do tempo” no século XIX e

despertado em pleno século XXI se vê em um mundo incompreensível já é bem conhecida. Mas é preciso salientar que ao menos em nosso querido Brasil haveria um lugar onde o nosso hipotético viajante se sentiria totalmente em casa. Como costuma ressaltar em suas palestras o professor Nelson Studart, este lugar seria a sala de aula de física

Os argumentos daqueles que defendem o ensino de física moderna no ensino médio têm enfocado, sobretudo, a necessidade de se passar para os estudantes uma imagem mais próxima do que se faz atualmente em física...

...enquanto aqueles que têm se colocado contra esta introdução apontam a dificuldade causada pelo caráter abstrato de seus conceitos e a profunda matematização de seus conteúdos

Eric Rogers (1902-1990) foi um dos melhores professores de física do século XX, autor de um livro-texto ainda hoje inigualável intitulado *Physics for the Inquiring Mind*. Rogers era inglês, mas morou boa parte de sua vida nos Estados Unidos, trabalhando na Universidade de Princeton e no Instituto de Pesquisas Avançadas, onde foi colega de Einstein. Desde cedo, dedicou-se com um brilhantismo incomum ao ensino da física, sempre encontrando alternativas criativas e originais para superar antigas dificuldades de aprendizagem. Rogers tinha em sua mente um fantástico arsenal de experimentos dos mais simples aos mais mirabolantes para ilustrar praticamente tudo que se possa imaginar no ensino da física.



por Einstein, os quais faziam as pessoas se sentirem bastante desconfortadas.

A primeira parte da minha história é imaginária, mas o término é real. A questão é: nós vamos ficar tão para trás – por meio século ou mesmo por um século – no ano 2000?

Bem, por que não?

Em 1700 havia um bom ensino de roldanas, de hidrostática – a maior parte de ramos da física que os gregos haviam descoberto. E mesmo hoje nós ensinamos uma porção de coisas úteis de física; assim, por que se preocupar com esta demora?

Por causa da taxa de comunicação!

Nós podemos viajar em volta do mundo em questão de dias em vez de meses; nós podemos enviar mensagens em volta do mundo em segundos; nós podemos mesmo ir à Lua. Trabalhos científicos estão sendo feitos não apenas por uns poucos selecionados com um interesse especial, como o nobre Robert Boyle ou o Nobel Niels Bohr. Nós não estamos apenas educando futuros professores de física – esperamos, de todo modo, que eles sejam à prova de tolos e que se desenvolvam quase que independentemente do nosso ensino. Nós estamos ensinando física para futuros técnicos, para pessoas em outras ciências e, acima de tudo, para o público educado em geral. Se nós nos mantivermos muito atrás no nosso ensino, nós estaremos cometendo um sério dano à compreensão popular.

Assim, eu faço um forte apelo para que nós tentemos acelerar.

Eric Rogers termina assim o seu pleito candente pelo ensino da física moderna nas escolas. Se levarmos em conta que este seu discurso foi feito em 1969, quase 40 anos atrás, podemos perceber a urgência cada vez maior para que o pleito deste influente professor de física venha a ser finalmente contemplado.

das nossas escolas brasileiras. Nelas, o nosso viajante do tempo sentir-se-ia em casa; nela desapareceriam todos aqueles objetos incompreensíveis existentes fora da sala de aula: computadores, aviões a jato, foguetes, CDs, DVDs, iPods, telefones celulares e toda essa complexidade de coisas que envolve o ser humano do século XXI. Nas salas de aula de física do nosso querido Brasil o nosso viajante do tempo encontraria apenas coisas como as suas velhas e conhecidas equações: $v = v_0 + a\Delta t$ e $s = s_0 + v_0\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2$. E junto ao velho quadro negro o nosso viajante identificaria um legítimo companheiro do seu tempo: o professor de física que se recusa a acompanhar a mudança e a evolução da história.

Isto mesmo que aqui está dito de forma direta e talvez até um tanto cínica, foi colocado com uma fina ironia por Eric Rogers na palestra de abertura de um congresso internacional de ensino de física no longínquo ano de 1969. Para abordar o problema, ele construiu uma pequena e irônica fábula que transcrevemos a seguir:

A primeira conferência mundial sobre o ensino da física – provavelmente promovida pelo GIREP e pela UNESCO – foi realizada no ano de 1700. Naquela conferência, as discussões sobre o ensino da física na escola chegaram a uma excelente concordância: a de que todos os professores sabiam muito bem que quando nós aplicamos uma força a um objeto ele se move com velocidade constante, e que quando dobramos esta força obtemos o dobro da velocidade. Eles até assistiram a uma boa demonstração experimental deste fato: em uma jarra alta contendo óleo foi liberada uma pequena esfera de vidro que desceu com velocidade constante; em seguida, foi liberada uma pequena esfera de ferro que desceu com

uma velocidade constante bem maior. Tudo, portanto, parecia estar em boa ordem.

A conferência votou que um tal ensino deveria continuar e que nada deveria ser mudado – exceto o baixo salário dos professores – e com respeito às recentemente descobertas “leis de Newton”, e ao trabalho de Newton como um todo, deveriam ser reservadas para ser lecionadas apenas em seminários avançados de pós-graduação nas universidades.

Um século depois, por volta de 1840, o GIREP organizou novamente uma Conferência Internacional sobre o ensino da física. As leis de Newton já eram então muito bem lecionadas nas escolas e eram até mesmo utilizadas para os propósitos que Newton esperara das mesmas: a construção de uma magnífica astronomia. O calórico já era também bem conhecido por todos os professores de física como alguma coisa que era perfeitamente conservada e capaz de explicar muitos experimentos: a mistura de água quente com água fria, a colocação de pedaços de chumbo quente na água, a descida por uma corda e o aquecimento produzido pela liberação do calórico contido na mesma.

A conferência decidiu então que a conservação do calórico deveria continuar a ser ensinada. Quanto à idéia de calor como energia, aquela estranha sugestão do jovem Joule e do professor Mayer na Alemanha, ela deveria ser reservada para estudos avançados nas universidades – e ainda assim com um severo aviso de que ela provavelmente não passava de uma especulação sem sentido, um puro ‘non sense’.

Em 1910, houve uma outra conferência internacional sobre o ensino da física. A mecânica newtoniana estava bem estabelecida e em bom uso, exceto pelo fato de que alguns matemáticos franceses haviam feito a mesma parecer mais difícil. A conservação geral da energia já era também bem aceita. Contudo, uma estranha idéia de Planck (que ele mesmo não gostava de todo) deveria ser reservada para seminários de pós-doutorado nas universidades. Assim, também, deveria ser feito com os infelizes ataques sobre geometria feitos

Bibliografia

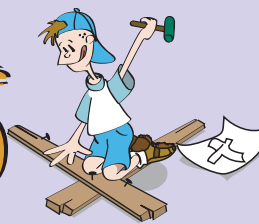
- [1] Alexandre Medeiros e Cleide Medeiros, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **22**, 299 (2005).
- [2] Eric Rogers, *Physics for the Inquiring Mind* (Princeton University Press, Princeton, 1962).
- [3] Brenda Jennison and Jon Ogborn, *Wonder and Delight: Essays in Science Education in Honour of the Life and Work of Eric Rogers 1902-1990* (Institute of Physics Publishing, Bristol, 1994).

Saiba mais

- Alexandre Medeiros, Revista do Centro de Educação da UFAL **13**, 93 (2005).
- Eric Rogers, *Astronomy for the Inquiring Mind* (Princeton University Press, Princeton, 1982).
- Eric Rogers, *Proceedings of the Seminar on the Teaching of Physics in Schools* (Royal Danish School of Educational Studies, 1969), p. 92-98.



Faça Você MESMO



Gramofone didático: quem quer ser DJ?

Quando o assunto é som todos querem curtir, nas baladas principalmente. Nesses ambientes o DJ desempenha um papel fundamental e muitos se destacam tornando-se ídolos ou exemplos de profissionais bem sucedidos. O termo DJ, abreviação de *disc-jockey*, foi inicialmente usado para identificar pessoas que tocavam discos em gramofones. Depois passou a designar os profissionais das emissoras de rádio que selecionavam as músicas gravadas em discos de vinil para o público da emissora. Hoje o DJ é considerado um músico, uma profissão desejada por muitos jovens. Usando sua habilidade e diferentes técnicas, o DJ gera o som a partir dos discos de vinil e também dos CD's, criam trilhas sonoras para filmes e comerciais de produtos, fazem a produção de shows

musicais e manipulam o som de diversas formas usando moderna tecnologia.

Trabalhar com o tema som nas séries do ensino fundamental e médio associando-o a figura do DJ, é uma excelente oportunidade de motivar os estudantes a se interessarem pela física e pela ciência. Dentro deste contexto, este artigo descreve a construção de um gramofone usando material reciclável e de baixo custo. Além da facilidade de construção um outro aspecto didático desse gramofone é o manuseio do disco pelos alu-

O termo DJ, abreviação de *disc-jockey*, foi inicialmente usado para identificar pessoas que tocavam discos em gramofones. Depois passou a designar os profissionais das emissoras de rádio que selecionavam as músicas gravadas em discos de vinil para o público da emissora

nos, quando são desafiados a serem "DJs", ou seja a manipularem o disco de forma a reproduzir a gravação. Esta atividade permite trabalhar com os conceitos de produção, propagação e gravação do som, bem como o conceito de ondas mecânicas, além de avaliar a importância da velocidade de rotação do disco na qualidade do som produzido.

O gramofone foi o primeiro aparelho capaz de registrar e reproduzir sons em escala comercial. O gramofone utilizando discos com gravações foi projetado em 1888 pelo alemão Emile Berliner e usa o mesmo princípio do fonógrafo (1887) de Thomas Alva Edison quanto à reprodução do som. Sendo um sistema puramente mecânico, o gramofone é basicamente composto por um cone que possui em seu vértice uma agulha de aço que toca um cilindro ou disco de vinil. Na superfície do disco existem sulcos onde o som foi gravado, estes são capazes de reproduzir a forma

de onda do som que originalmente os gerou. Ao girar o disco com uma manivela, a agulha vai percorrendo os sulcos e transmitindo as vibrações ao cone que funciona como uma espécie de alto-falante, concentrando e amplificando o som produzido pela vibração da agulha, daí é possível ouvir o que está gravado no disco. A velocidade de rotação do disco determina a taxa de reprodução do som. Este também é o princípio de funcionamento dos toca-discos eletrônicos, hoje praticamente em desuso pelo surgimento de novas

tecnologias como os atuais CD's.

Construindo um gramofone

Para a montagem do gramofone mostrado na Fig. 1 serão necessárias duas embalagens do tipo PET com capacidade de dois litros, que servirão de suporte para o cone e para o prato do disco, respectivamente. As garrafas devem ser preenchidas com água, de maneira a adquirir estabilidade suficiente para suportarem a montagem sobre elas. Separe também duas tampinhas avulsas de garrafa PET (além daquelas da que já estão nas próprias garrafas). Precisa-se ainda de uma folha de cartolina para a construção do cone, um alfinete de costura, uma vareta de bambu ou arame rígido que será utilizado como suporte para o cone, fita adesiva, massa de modelar ou epóxi e um disco de vinil. Um CD inutilizado (ou um disco de madeira) recoberto por um disco de borracha ou etil vinil acetato (E.V.A.) servirá



Figura 1. Gramofone didático.

de prato para o disco de vinil e um lápis comum que será o eixo do prato.

Primeiramente construa o cone do gramofone e seu suporte. Embora o tamanho do cone possa ser variado, usando toda a cartolina produz-se um cone de tamanho adequado para uma boa reprodução do som.

Faça um pequeno orifício na tampa da garrafa que servirá de suporte para o cone, de modo que a vareta de bambu possa atravessá-lo ficando presa firmemente. O comprimento da vareta deve ser um pouco superior ao diâmetro do cone. Faça dois furos nas bordas do cone, em extremidades opostas, de modo que a vareta de bambu possa passar por eles como mostra a Fig. 1. No vértice do cone espete o alfinete, de maneira que a sua ponta fique orientada para baixo para que possa tocar o disco, como ilustrado na Fig. 2.

O próximo passo é construir o suporte sobre o qual o disco de vinil será colocado, permitindo que este possa girar sob a agulha. Faça um furo na tampa da garrafa que servirá de suporte para o prato, com um diâmetro apropriado para que o lápis possa atravessá-lo de maneira justa. Em seguida, confecciona-se o prato fazendo um furo bem no centro de cada uma das tampinhas avulsas de garrafa PET, com um diâmetro um pouco maior que o do lápis. Enrole a fita adesiva no corpo das tampinhas colocando-as de modo que suas extremidades superiores fiquem opostas. Com a fita adesiva cole o CD sobre as tampinhas, alinhando



Figura 2. Fixação da agulha.

os orifícios (Fig. 3). Recorte um disco de E.V.A, ou borracha do tamanho do CD, com um orifício de igual diâmetro e fixe-o sobre o CD, isto evita que o disco de vinil deslize sobre o prato. Coloque o prato sobre o lápis que foi fixado na garrafa completando o suporte para o disco de vinil (Fig. 4).

Operando o gramofone

Sobre o prato giratório coloca-se o disco de vinil escolhido e sobre ele a ponta da agulha que está fixada no cone. Girando-se o vinil com a ponta de um dos dedos, pode-se ouvir por meio do cone, o som reproduzido. O sentido de rotação do disco de vinil deve ser horário e, portanto a ponta da agulha deve ser posicionada de modo a permitir esse movimento. Procurar a velocidade correta para a rotação do disco é um desafio e mantê-la constante também.

Os alunos são desafiados a competirem entre si, e a elegerem no grupo quem consegue manter o ritmo da música e reproduzi-la de maneira mais fiel a partir da rotação do disco. Ou seja, quem é o melhor DJ!

Material utilizado

O esquema da Fig. 6 apresenta o material utilizado na montagem do gramofone.

- A - cone de cartolina;
- B - alfinete de costura;
- C - vareta de bambu presa à tampa da garrafa;
- D, J - garrafa PET (com água até a



Figura 5. Treinando para DJ!



Figura 3. Fixando o suporte no prato.



Figura 4. Prato do gramofone.

- metade para servir de apoio);
- E - disco de vinil;
- F - disco de E.V.A, ou borracha (pode ser feito de câmara de ar de pneu);
- G - CD, ou disco de madeira;
- H - tampinhas de garrafa PET, perfuradas e invertidas, coladas uma a outro com fita adesiva;
- I - lápis para eixo dos discos.

Conclusão

O gramofone apresentado tem sido usado com alunos do ensino fundamental em oficinas de ciências, através de projetos de extensão da universidade e tem despertado



grande interesse dos estudantes. A montagem proposta, por sua simplicidade pode ser executada por

crianças ou adolescentes durante o período de tempo de uma aula. Conceitos físicos associados ao som tais

como recepção, produção, propagação, frequência, utilidade do alto-falante, podem ser explorados pelo professor de acordo com sua prática pedagógica. O manuseio do gramofone pelos alunos pode servir de estímulo para discussões sobre os processos de gravação e reprodução de músicas em CD's e outras tecnologias atuais para armazenagem e reprodução de músicas, por exemplo, os iPods (*players* de áudio digital).

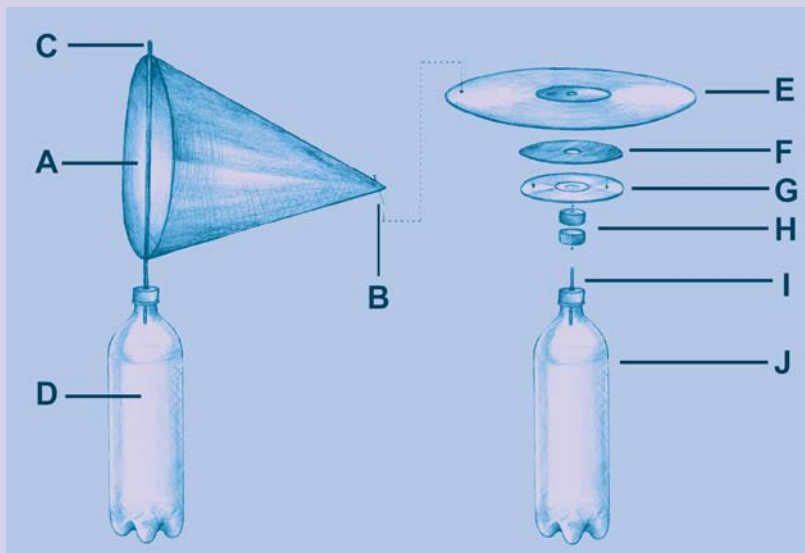


Figura 6. Esquema de montagem e material utilizado na construção do gramofone.

Apoio

PROEX-UNESP

Leandro Xavier Moreno
Deisy Piedade Munhoz Lopes
Alzira C. de Mello Stein-Barana
E-mail: alzirasb@rc.unesp.br
Departamento de Física
Universidade Estadual Paulista
Rio Claro, SP, Brasil

Tomando refrigerante... com dois canudos?

Procedimento

Coloque dois canudos dentro de uma garrafa e tome o líquido. “Funciona”, não é? Agora, mantenha os dois canudos na boca, mas com a outra extremidade de um deles dentro do líquido e a do outro, fora da garrafa, como na figura. E agora, você consegue tomar?



Observe que...

Você toma o líquido normalmente quando os dois canudos estão dentro deste; quando um deles está fora, a dificuldade aumenta muito (se os canudos forem de diâmetro relativamente grande, você não consegue tomar. Experimente!).

Comentários

Quando os dois canudos estão imersos no líquido, a sucção com a boca faz com que a pressão no interior destes seja menor que a da atmosfera, e o líquido sobe. Se a extremidade de um dos canudos está fora do líquido, a pressão nesta região é a da atmosfera; a tentativa de diminuir a pressão no interior do canudo imerso no líquido tem como único resultado fazer com que o ar entre pelo outro canudo, mantendo a pressão inalterada. Se não há diferença de pressão entre a parte externa do líquido e o interior da boca, então este não sobe!

Tópicos para discussão

Desenhe esquematicamente a garrafa com líquido, os dois canudos dentro deste, e a boca, identificando claramente a(s) região(ões) onde a pressão é a da atmosfera e a(s) região(ões) onde

ela é menor. Você percebe por que, nesta situação, é possível beber o líquido?

Repita o desenho esquemático, desta vez com um dos canudos fora do líquido. Há região(ões) de baixa pressão? Sua resposta explica por que o líquido não sobe?

Duas regiões, após terem sido unidas por um canudo durante algum tempo, podem apresentar pressões diferentes? Uma das regiões poderia ser o interior da boca e a outra, o exterior do líquido.

Ainda considerando um canudo dentro e o outro fora do líquido: a quantidade de água na garrafa faz diferença? Em caso afirmativo, você sabe explicar por quê? Note que, em uma garrafa cheia, um dos canudos está em sua maior parte imerso no líquido.

Tente explicar por que, ao usar canudos de grande diâmetro, a experiência funciona melhor, ou seja, é bem mais difícil tomar algum líquido.

Bruna Antunes Biffi
Licenciatura em Química
Universidade de Caxias do Sul

Francisco Catelli
Departamento de Física e Química
Universidade de Caxias do Sul

Medindo o índice de refração de líquidos usando o conceito de difração da luz

A facilidade de encontrar materiais de baixo custo (como ponteira laser, CD, etc) permite a realização de experimentos simples e com isto introduzir conceitos da óptica física como difração e interferência da luz.

Esta experiência tem como objetivo calcular o índice de refração da água com uma boa precisão e mostrar a variação do comprimento de onda da luz quando a mesma propaga em meios diferentes como ar e água.

O CD é constituído por trilhas com espaçamentos da ordem de $1,6\ \mu\text{m}$ onde são armazenados os dados, e esse dispositivo funciona como uma rede de difração por reflexão ou transmissão da luz, que é usada neste experimento retirando a película protetora.

Conceitos de óptica, como difração e interferência, podem ser apresentados utilizando-se materiais de baixo custo e com erro de apenas 2%

Materiais

- Ponteira laser
- Um pedaço de CD sem a película
- Recipiente de plástico como pote de maionese ou caixa retangular transparente
- Água
- Pedaço de papel
- Fita adesiva
- Régua

Advertência: não incida a ponteira laser nos olhos, pois trata-se de uma luz muito intensa e pode causar danos irreversíveis à retina.

Procedimento experimental

Com uma tesoura ou estilete cortar uma secção do CD, como mostra a Fig. 1. É retirada a proteção metálica, utilizando um jato de ar comprimido ou fita adesiva, de modo a obter uma rede de difração por transmissão.

Prenda com fita adesiva o pedaço



Figura 1. Pedaço de CD cortado sem a proteção metálica.

de papel, que servirá de anteparo, com uma risca no centro e na posição vertical. Posicione o pedaço de CD, que servirá como rede de difração, de modo que quando incidir a luz laser a difração de ordem zero irá coincidir com a risca do papel e as demais ordens fiquem na posição horizontal. Ambos, o papel e o CD, têm que ser posicionados na parte externa do frasco e em extremidades opostas. Coloque

água no frasco de modo que a luz difratada pelo CD se propague alternativamente no ar e na água, dependendo do ponto de incidência da ponteira. O experimento está montado como mostra a Fig. 2.

Antes de iniciar o experimento faça o ensaio incidindo luz laser perpendicularmente a superfície do CD nas duas regiões, no ar e na água, e veja se os padrões difratados no anteparo estão na horizontal e simétricos em relação a difração de ordem zero. Isto é um fator importante para a obtenção de boa precisão nas medidas.

Procure utilizar água limpa e se

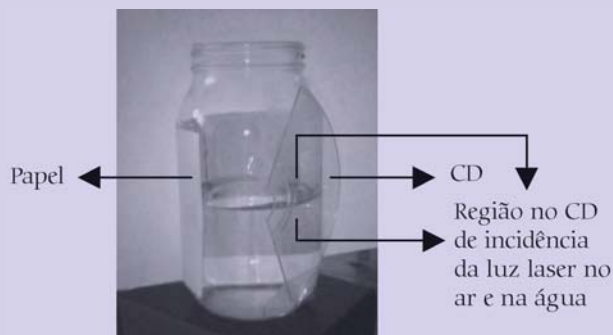


Figura 2. Montagem experimental.

possível realize o experimento em ambiente parcialmente escurecido para facilitar a leitura.

Com a ponteira laser, faça incidir um feixe perpendicularmente sobre a rede de difração (CD), fazendo coincidir o máximo central com o risco contido no anteparo, como mostram as fotos das Figs. 3.1 e 3.2.

Meça com uma régua a distância entre o máximo central e a primeira ordem de difração. Observe que se posicionar a ponteira perpendicularmente ao CD, os pontos brilhantes correspondentes à 1ª ordem de difração devem estar simétricos em relação ao máximo central.

Na Fig. 4 está representada esquematicamente a difração com a luz se propagando no ar (assumindo $n_{\text{ar}} \approx 1$).

De modo similar obtemos a mesma representação esquemática da difração na água, havendo uma diminuição da distância entre a difração de ordem zero e a difração de 1ª ordem, indicando uma dimi-



Figura 3.1. Foto da difração da luz no ar.



Figura 3.2. Foto da difração da luz na água.

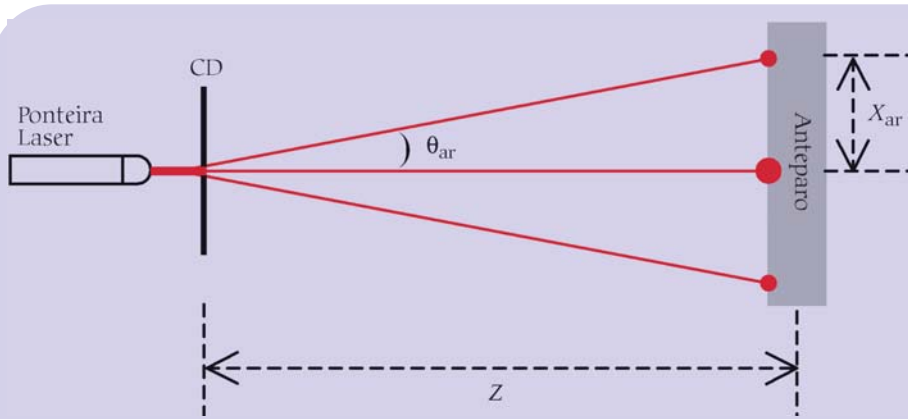


Figura 4. Representação esquemática da difração no ar.

nuição do comprimento de onda da luz, como será discutido a seguir.

Pode-se mostrar que a equação de uma rede de difração pode ser dada por

$$d \operatorname{sen} \theta = m \lambda,$$

onde d é a constante da rede de difração (e nesse caso $d = 1,6$ mm), λ é o comprimento de onda da ponteira laser e o ângulo θ localiza as ordens de difração, e nesse caso vamos considerar apenas a 1ª ordem de difração que corresponde a $m = 1$, então a equação fica

$$d \operatorname{sen} \theta = \lambda. \quad (1)$$

Relacionando as equações nos respectivos meios, teremos a relação

$$\frac{\operatorname{sen} \theta_{\text{ar}}}{\operatorname{sen} \theta_{\text{água}}} = \frac{\lambda_{\text{ar}}}{\lambda_{\text{água}}}. \quad (2)$$

Através da Fig. 4 podemos escrever

$$\operatorname{sen} \theta_{\text{ar}} = \frac{X_{\text{ar}}}{\sqrt{X_{\text{ar}}^2 + Z^2}}. \quad (3)$$

De forma análoga teremos

$$\operatorname{sen} \theta_{\text{água}} = \frac{X_{\text{água}}}{\sqrt{X_{\text{água}}^2 + Z^2}}, \quad (4)$$

e a razão entre as Eqs. (3) e (4) fica

$$\frac{\operatorname{sen} \theta_{\text{ar}}}{\operatorname{sen} \theta_{\text{água}}} = \frac{X_{\text{ar}} \sqrt{X_{\text{água}}^2 + Z^2}}{X_{\text{água}} \sqrt{X_{\text{ar}}^2 + Z^2}}. \quad (5)$$

Igualando as Eqs. (2) e (5), fica

$$\frac{\lambda_{\text{ar}}}{\lambda_{\text{água}}} = \frac{X_{\text{ar}} \sqrt{X_{\text{água}}^2 + Z^2}}{X_{\text{água}} \sqrt{X_{\text{ar}}^2 + Z^2}}. \quad (6)$$

Como a fonte é a mesma (ponteira laser) a frequência f não se altera ao propagar na água ou no ar. Sendo

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

podemos escrever para os dois meios

$$\frac{v}{\lambda} = \frac{v_{\text{ar}}}{\lambda_{\text{ar}}} = \frac{v_{\text{água}}}{\lambda_{\text{água}}},$$

e usando $n = c/v$, teremos:

$$\frac{\lambda_{\text{água}}}{\lambda_{\text{ar}}} = \frac{v_{\text{água}}}{v_{\text{ar}}} = \frac{1}{n_{\text{água}}} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{água}}}.$$

Considerando $n_{\text{ar}} \cong 1$ e considerando a Eq. (6), teremos

$$n_{\text{água}} = \frac{\lambda_{\text{ar}}}{\lambda_{\text{água}}} = \frac{X_{\text{ar}} \sqrt{X_{\text{água}}^2 + Z^2}}{X_{\text{água}} \sqrt{X_{\text{ar}}^2 + Z^2}}. \quad (7)$$

Portanto para obter o índice de refração da água, basta medir X_{ar} , $X_{\text{água}}$ e Z .

Resultados e discussão

Utilizando a Eq. (7) e tomando os devidos cuidados com o experimento, obtivemos os valores do índice de refração da água entre 1,31 a 1,33, e isto representa um erro (da ordem de 2%) em relação ao valor correto, 1,33.

Para uma medida mais direta, podemos fazer a aproximação $\operatorname{sen} \theta \cong \operatorname{tg} \theta \cong \theta$ e com isto a Eq. (7) pode ser simplificada:

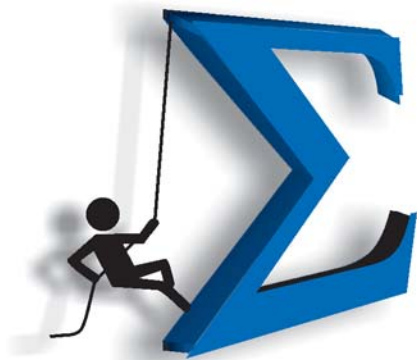
$$n_{\text{água}} = \frac{\lambda_{\text{ar}}}{\lambda_{\text{água}}} \cong \frac{X_{\text{ar}}}{X_{\text{água}}}. \quad (8)$$

Utilizando esta equação obtém-se o índice de refração da água ou de outro líquido qualquer com uma precisão menor, todavia ainda de forma bastante simples e direta.

Conclusão

Utilizando materiais de baixo custo, mostramos como calcular o índice de refração da água com boa precisão. Esse experimento também é uma boa oportunidade para introduzir conceitos de difração e interferência da luz e mostrar a dependência do comprimento de onda da luz com o meio em que ela se propaga.

Flávia Matioli da Silva
Mikiya Muramatsu
E-mail: mmuramat@if.usp.br
Instituto de Física
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, Brasil



Problemas Olímpicos

Soluções dos problemas do número anterior

1 Cálculo do trabalho entre duas partículas carregadas. Da mecânica temos, do teorema trabalho-energia, que para sistemas não-conservativos, $W_{\text{conservativo}} = -\Delta U$, e $W_{\text{não-conservativo}} = \Delta K + \Delta U$, sendo K e U as energias cinética e potencial do sistema, respectivamente. Assim, $W_{\text{não-conservativo}} = \Delta(K + U) = \Delta E$. No caso em questão, temos

$$\Delta U = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

e

$$\Delta K = \frac{1}{2} m(v_1^2 - v_2^2).$$

Usando ainda que

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

obtemos o resultado para o trabalho,

$$W = \frac{qQ}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

2 Cálculo de pressão e temperatura em vários estados de um motor de combustão. Para qualquer ponto do ciclo vale a equação de estados: $PV = RT$. Para um processo adiabático, $P_a V_a^\gamma = P_b V_b^\gamma$, ou em termos da temperatura, $T_a V_a^{\gamma-1} = T_b V_b^{\gamma-1}$.

Desta forma basta ir substituindo os valores, resultando:

Estado	1	2	3	4
P (atm)	1	23.37	46.74	2
T (K)	300	738	1476	599.7

3 Luz branca incidindo em um filme fino de sabão. Do diagrama apresentado na figura, tiramos que

$$AB + BC = \frac{2d}{\cos \beta}.$$

O caminho óptico de A até C é

$$ABC = \frac{2dn}{\cos \beta},$$

e $AC \sin \alpha = 2d \operatorname{tg} \beta \sin \alpha$ (lembrar

que o caminho óptico em um meio de índice de refração n é a distância vezes n).

Quando a luz viaja de um meio mais denso para outro menos denso, a luz refletida sofre uma mudança de fase de π , correspondendo a um caminho óptico de $\lambda/2$. A diferença no caminho óptico entre a luz refletida na superfície superior do filme de sabão e a luz refletida na superfície inferior do filme é

$$D = \frac{2dn}{\cos \beta} - 2d \operatorname{tg} \beta \sin \alpha.$$

A condição para que os dois raios sofram uma interferência construtiva é $D = (2m + 1)\lambda/2$, com m inteiro. Da lei de refração, $\sin \alpha = n \sin \beta$; a mínima espessura ocorrerá para $m = 0$. Substituindo os valores fornecidos resulta que a espessura mínima do filme de sabão é

$$d = 0.10 \mu\text{m}.$$

Soluções dos problemas do volume 3, número 2

1 A energia liberada por uma bomba atômica. O raio da "bola de fogo" em uma atmosfera de densidade ρ depende dessa densidade,

do tempo t após a explosão e da energia E liberada pela bomba.

a) Usando análise dimensional e a expressão $E = \rho^x R^y t^z$, obtém-se

$$E = \rho R^5 t^{-2}.$$

b) Abaixo, uma tabela típica de R em metros e t em mili-segundos, obtida da seqüência das fotos do problema.

t (ms)	0.24	0.38	0.52	0.66	0.80	0.94	1.08	1.22	1.36	1.50	1.65	1.79	1.83
R (m)	20.0	25.0	28.0	32.0	35.0	38.0	39.0	41.0	43.0	44.5	46.0	47.0	49.0
$\log t$	-3.32	-3.42	-3.28	-3.18	-3.10	-3.03	-2.97	-2.91	-2.87	-2.82	-2.78	-2.72	-2.70
$\log R$	1.30	1.40	1.45	1.51	1.54	1.58	1.59	1.61	1.63	1.65	1.66	1.67	1.69
$5/2 \log R$	3.25	3.49	3.62	3.76	3.86	2.95	3.98	4.03	4.08	4.13	4.15	4.18	4.23

c) Ao se distribuir os pontos em um papel log-log, uma reta deve ser obtida.

d) O ponto onde a reta corta o eixo log $t = 0$ vale $1/2 \log(E/\rho)$, pois $5/2 \log R = 1/2 \log(E/\rho) + \log t$.

Quando $\log t = 0$, obtém-se, do gráfico, $1/2 \log(E/\rho) = 7,0$. Portanto, $E = 10^{14}$ J.

e) 1 ton TNT = $4,2 \times 10^9$ J. Logo $E = 10^{14}/4,3 \times 10^9 \sim 23.000$ ton TNT (~ 23 quilotons). A energia da bomba que explodiu em Hiroshima foi estimada como equivalente a cerca de 20 quilotons.

2 Um sistema estelar binário constituído por uma estrela ordinária de massa m_0 e raio R e uma estrela de nêutrons de massa M , girando em torno de um centro de massa comum.

a) Cálculo da distância da Terra ao sistema: a energia total irradiada por segundo é dada por $4\pi R^2 \sigma T^4$, onde σ é a constante de Stefan-Boltzman.

A energia incidente sobre uma unidade de área da Terra por segundo é

$$P = \frac{4\pi R^2 \sigma T^4}{4\pi \ell^2}, \text{ o que dá } R = (P/\sigma T^4)^{1/2} \ell.$$

A energia de um fóton é $hf = hc/\lambda$; A massa equivalente de um fóton é $h/c\lambda$. Assim, a conservação da energia do fóton dá

$$\frac{hc}{\lambda_0} - \frac{Gm_0}{R} = \frac{h}{c\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda},$$

o que leva a

$$R = \frac{Gm_0(\lambda_0 + \Delta\lambda)}{c^2 \Delta\lambda}.$$

Essas duas equações levam a

$$m_0 = \frac{c^2 \Delta\lambda (P/\sigma T^4)^{1/2}}{G(\lambda_0 + \Delta\lambda)} \ell.$$

As estrelas estão girando em torno do centro de massa com velocidades angulares iguais

$$\omega = (2\pi/2\tau) = \pi/\tau.$$

As condições de equilíbrio para as estrelas são

$$\frac{GMm_0}{r_1 + r_2} = m_0 r_1 \omega^2 = M r_2 \omega^2,$$

com

$$r_1 = \ell \frac{\Delta\theta}{2}, \quad r_2 = \ell \frac{\Delta\phi}{2}.$$

Dessas equações acima, obtemos:

$$\ell = \left[\frac{8c^2 \Delta\lambda (P/\sigma T^4)^{1/2}}{\Delta\phi (\pi/\tau)^2 (\lambda_0 + \Delta\lambda) (\Delta\theta + \Delta\phi)^2} \right]^{1/2}.$$

b) A distância de máxima aproximação das duas estrelas do sistema binário: a conservação do momento angular para a estrela ordinária é

$$mr^2 \omega = m_0 r_0 \omega_0.$$

A conservação do momento angular para dm :

$$r^2 \omega dm = r_f^2 \omega_f dm,$$

onde ω_f é a velocidade angular do anel. O equilíbrio no estado original dá:

$$\omega_0 = \left(\frac{GM}{r_0} \right)^{1/2}, \quad \omega_f = \frac{m_0 r_0}{m r_f^2} \left(\frac{GM}{r_0} \right)^{1/2}.$$

A conservação da energia para dm leva a

$$\frac{1}{2} dm (v_0^2 + r^2 \omega^2) - \frac{GM dm}{r} = \frac{1}{2} dm r_f^2 \omega_f^2 - \frac{GM dm}{r_f}.$$

Substituindo ω , obtém-se

$$v_0^2 + \frac{m_0^2 r_0 GM}{m^2} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_f^2} \right) - 2GM \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_f} \right) = 0.$$

Como $r_0 > r_f$, se $r > r_0$ os termos em $1/r$ e $1/r^2$ podem ser desprezados. Então

$$r_f = \frac{GM}{v_0^2} \left[\left(1 + \frac{m_0^2 r_0 v_0^2}{GM m^2} \right)^{1/2} - 1 \right].$$

Para mostrar que $r > r_0$: a variação do momento angular da estrela ordinária em seu sistema de referência é

$$-\frac{GMm}{r^2} + m r \omega^2 - m \frac{dv_r}{dt} = -v_0 \frac{dm_{\text{gas}}}{dt}.$$

Essa equação implica na existência de uma força inicialmente para fora e, portanto, r começa a crescer. Usando a conservação do momento angular da estrela ordinária,

$$m r \omega^2 = \frac{m_0^2 r_0 \omega_0^2}{m r^3}.$$

Logo, a razão força gravitacional/força centrípeta é proporcional a $m^2 r$. A massa m diminui. Se r começa também a diminuir após algum tempo, essa razão começa a diminuir, o que é

uma contradição. Logo, $r > r_0$.

3 A lebre perseguindo a raposa. Começemos por calcular o tempo necessário para que a raposa alcance a lebre. Considere a projeção das velocidades ao longo da linha que os conecta. A velocidade relativa da raposa e da lebre ao longo desta linha é

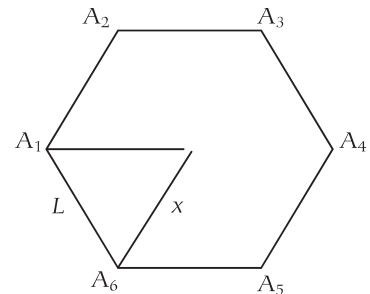
$$v_{\text{rel}} = v(1 - \cos \alpha),$$

de onde obtemos

$$\tau = \frac{L}{v_{\text{rel}}} = \frac{L}{v[1 - \cos \alpha]}$$

que é correta para todos os três casos.

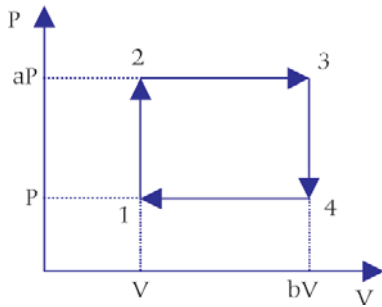
Para se determinar o ponto onde a raposa pega a lebre, construímos um hexágono de lado L , como o da figura. Partindo do ponto A_1 , movendo-se diretamente para o ponto A_2 , do ponto A_2 para o A_3 e assim por diante (que é como a raposa persegue a lebre).



Ao longo da corrida este hexágono ira girar e encolher, mas mantendo-se regular, de modo que o ponto do encontro dos animais será o centro que se localiza a uma distância x da posição inicial da raposa. Caso o ângulo fosse de 90° teríamos um quadrado ao invés de um hexágono, e se o ângulo fosse 40° , teríamos um eneágono. Em qualquer caso a distância procurada será

$$x = \frac{L}{2 \sin(\alpha/2)}.$$

4 Eficiência de uma máquina térmica operando com um gás monoatômico rarefeito em ciclos. Do enunciado do problema podemos desenharmos o ciclo em um diagrama PV , como mostrado na figura abaixo.



O gás, de n moles, recebe calor durante os processos 1-2 e 2-3

$$Q = \frac{3}{2}nR(T_3 - T_1) + aP(b - 1)V =$$

$$\left[\frac{3}{2}(ab - 1) + a(b - 1) \right] PV.$$

O trabalho realizado no ciclo 1-2-3-4-1 será

$$W = [(a - 1)(b - 1)]PV.$$

A eficiência será portanto

$$\eta = \frac{W}{Q} = \frac{(a - 1)(b - 1)}{\frac{3}{2}(ab - 1) + a(b - 1)} =$$

$$1 - \frac{1}{\frac{5}{2} - \frac{1}{b} - \frac{1}{2ab}},$$

ou seja, a eficiência aumenta com a e b , e para valores muito grandes de a e b ela se aproxima de

$$\eta = 2/5 = 0.4 = 40\%.$$

5 Capacitor variável de capacitância inicial C_0 carregado a uma ddp V . A corrente elétrica no circuito é determinada pela queda de tensão sobre o resistor, que é justamente $I = V/R$. Como a corrente deve ser estacionária, a queda de tensão no capacitor será também constante, isto é

$$\frac{q_0}{C_0} = \frac{q_0 - \Delta q}{C},$$

em que q_0 é a carga inicial no capacitor, $\Delta q = It = Vt/R$ é a carga fluindo pelo circuito no instante t , e C é a capacitância naquele momento. Segue então que

$$C = C_0 \left(1 - \frac{\Delta q}{q_0} \right) = C_0 \left(1 - \frac{t}{RC_0} \right).$$

A variação na energia do sistema é igual ao trabalho realizado pelas forças externas,

$$\left(\frac{CV^2}{2} - \frac{C_0V^2}{2} \right) + I^2Rt = Pt,$$

em que P é a potência das forças externas. Com isso obtemos

$$P = \frac{V^2}{2R}.$$

Novos problemas

(Selecionados da extinta revista Quantum, da Associação de Professores da Rússia)

1 Uma esteira rolante: Uma pessoa sobe a partir do chão em uma primeira esteira rolante em movimento, e então passa para outra esteira que anda mais rapidamente, e assim sucessivamente. Considere a primeira esteira rolando com uma velocidade constante $v_1 = 2$ m/s. Uma pessoa sobe nela perpendicularmente à sua direção de movimento. Ao subir, a pessoa fica firmemente na esteira (não ocorre deslizamento), e então passa para a segunda esteira também entrando perpendicularmente ao seu movimento. A carga máxima projetada para tais esteiras (número de pessoas subindo nelas) é de $N = 10$ pessoas/s, e a massa média das pessoas é suposta ser $M = 80$ kg. Qual é a força mínima necessária para puxar a esteira horizontalmente a uma velocidade constante? Que força deve ser aplicada na segunda esteira

para que ela se mova com velocidade constante de $v_2 = 3$ m/s? Suponha que o número de pessoas em cada esteira seja o mesmo.

2 Célula solar: um voltímetro multiescala é composto de um microamperímetro sensível e um conjunto de resistências em série é usado para se estudar uma célula solar. Quando ele é conectado à célula usando 1-volt de escala, lê-se $V_1 = 0.7$ V, e usando a escala de 10 V lê-se $V_2 = 2.6$ V. Qual seria a leitura se a escala usada for de 100 V? É sabido que sob iluminação constante uma célula solar é uma fonte de força eletromotriz acoplada com uma grande resistência em série.

3 Circuito oscilante: Um capacitor em um circuito com a chave S aberta é carregado até um

potencial V_0 (veja a figura abaixo). A chave é então fechada, e após algum tempo a corrente cessa. Qual deve ser V_0 de modo a carregar o capacitor para que a voltagem estacionária $V_{ss} = 1$ V com sua polaridade oposta à sua polaridade inicial? Suponha que a força eletromotriz de cada bateria seja $E = 1.5$ V e que os diodos sejam ideais.

