

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 - por-

que 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.

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-

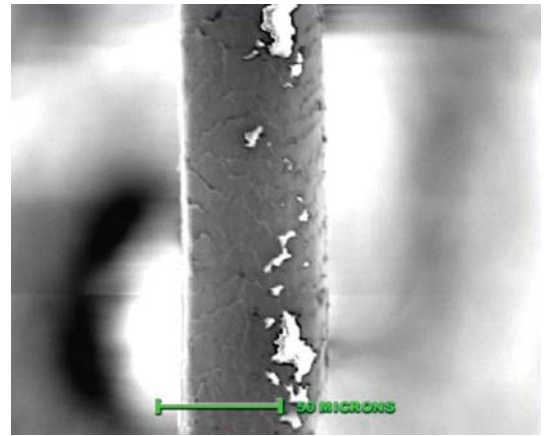


Figura 1. Qual é o diâmetro de um fio de cabelo? Imagens de microscopia interessantes como essa estão no sítio: <http://ion.asu.edu>.

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

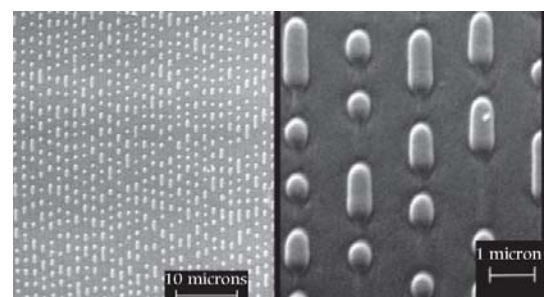


Figura 2. Gravações de dados em um CD fotografadas por microscopia eletrônica. Fonte: http://www.emal.engin.umich.edu/courses/SEM_lectureCW/SEM_frontpage.htm1.



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?

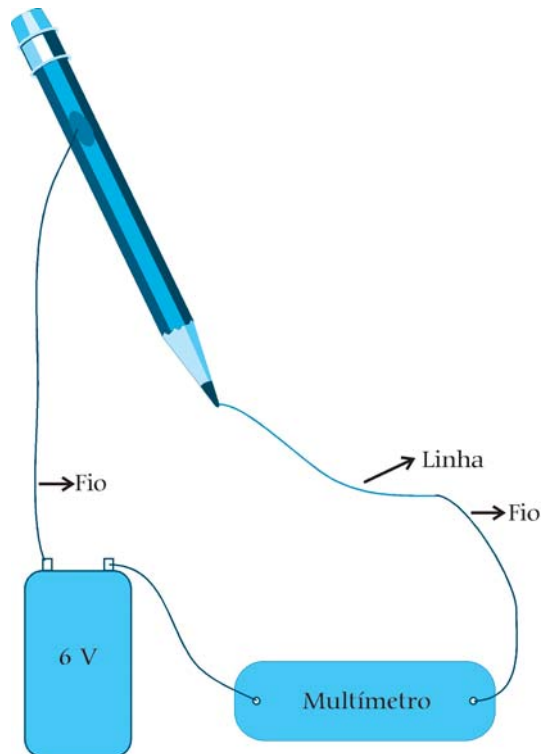


Figura 4. Experimento de resistência elétrica de uma linha desenhada a lápis.

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

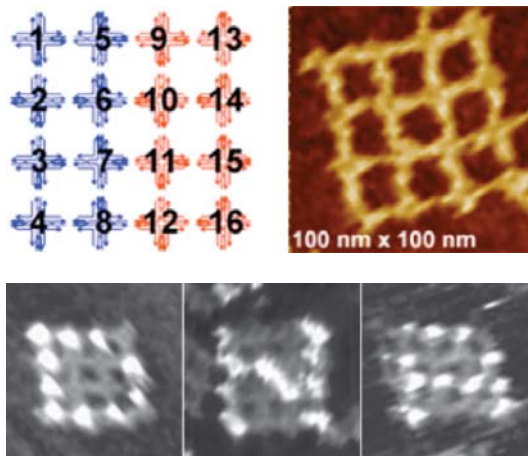


Figura 6. Auto-arranjo de moléculas de DNA formando um reticulado. Algumas moléculas são funcionalizadas com partículas metálicas e se auto-organizam formando as letras D, N e A. Resultados obtidos por um grupo de pesquisadores da Universidade de Duke nos EUA. Fonte: <http://www.physorg.com/news9322.html>.



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

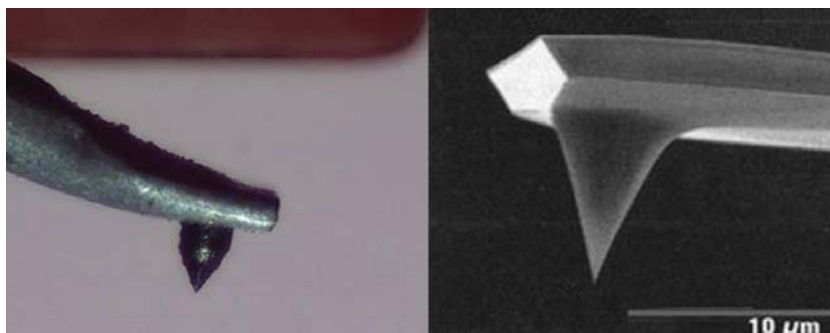


Figura 9. A agulha de um toca-discos (esquerda) e a ponta de um microscópio de força atômica (direita): quais são as semelhanças e quais as diferenças?

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>.