

Memória

Há mais espaços lá embaixo*

Richard P. Feynman

Eu imagino que um físico experimental deva frequentemente olhar com inveja para homens como Kamerlingh Onnes, que descobriu o campo das baixas temperaturas, que parece não ter fim e no qual pode-se sempre ir mais e mais fundo. Um homem assim é um líder e tem um certo monopólio temporário na aventura científica. Percy Bridgman, ao projetar um meio de obter altas pressões, abriu outro novo campo e foi capaz de penetrar nele e de orientar-nos nesse novo percurso. O desenvolvimento de vácuos mais e mais perfeitos foi um desenvolvimento contínuo do mesmo tipo. Eu gostaria de descrever um campo no qual pouco tem sido feito, mas no qual, em princípio, uma enormidade pode ser conseguida. Esse campo não é exatamente do mesmo tipo que os outros, no sentido em que não nos dirá muito sobre a física fundamental (na linha de “o que são as partículas estranhas?”), mas assemelha-se mais com a física do estado sólido, no sentido em que pode dizer-nos muitas coisas de grande interesse sobre os estranhos fenômenos que ocorrem em situações complexas; além disso, um aspecto muito importante é que esse campo terá um enorme número de aplicações técnicas.

O que eu quero falar é sobre o problema de manipular e controlar coisas em escala atômica.

Tão logo eu menciono isto, as pessoas me falam sobre miniaturização e o quanto ela tem progredido nos dias de hoje. Elas contam-me sobre motores

* Artigo publicado no Jornal *Comciência*, novembro 2002, edição Especial Nanociência e Nanotecnologia, Revista Eletrônica de Jornalismo Científica, da Unicamp. Texto traduzido por Roberto Belisário e Elizabeth Gigliotti de Sousa.

elétricos com o tamanho de uma unha do seu dedo mindinho. E que há um dispositivo no mercado, dizem elas, com o qual pode-se escrever o *Pai Nosso* na cabeça de um alfinete. Mas isso não é nada: é o passo mais primitivo e hesitante na direção que eu pretendo discutir. É um novo mundo surpreendentemente pequeno. No ano 2000, quando olharem para esta época, elas se perguntarão por que só no ano de 1960 que alguém começou a se movimentar seriamente nessa direção.

POR QUE NÃO PODEMOS ESCREVER OS 24 VOLUMES INTEIROS DA ENCICLOPÉDIA BRITÂNICA NA CABEÇA DE UM ALFINETE?

Vamos ver o que estaria envolvido nisso. A cabeça de um alfinete tem um dezesseis avos de polegada de largura. Se você aumentar seu diâmetro 25 mil vezes, a área da cabeça do alfinete será igual a área de todas as páginas da Enciclopédia Britânica. Assim, tudo o que se precisa fazer é reduzir 25 mil vezes em tamanho todo o texto da Enciclopédia. Isso é possível? O poder de resolução do olho é de cerca de 1/120 de uma polegada – aproximadamente, o diâmetro de um dos pequenos pontos em uma das boas e vetustas edições da Enciclopédia. Isto, quando você diminui em 25 mil vezes, ainda tem 80 angstroms de diâmetro – 32 átomos de largura, em um metal ordinário. Em outras palavras, um daqueles pontos ainda poderá conter em sua área 1.000 átomos. Assim, cada ponto pode ter seu tamanho facilmente ajustado segundo o requerido pela gravação, e não resta dúvida sobre se há espaço suficiente na cabeça de um alfinete para toda a Enciclopédia Britânica.

Além disso, ela poderá ser lida se puder ser escrita dessa forma. Imaginemos que ela seja escrita em letras em alto-relevo de metal; ou seja, onde existe o preto na enciclopédia, fazemos letras de metal em alto-relevo com 1/25.000 do seu tamanho ordinário. Como leríamos isso?

Se tivéssemos algo escrito dessa forma, poderíamos lê-lo usando técnicas hoje comuns. (Eles indubitavelmente encontrarão um meio melhor quando o tivermos de fato escrito, mas, para sermos realistas, vou considerar apenas técnicas conhecidas hoje.) Pressionariamos o metal sobre um material plástico e faríamos um molde; então, tirariamos muito cuidadosamente o plástico; vaporizariamos sílica sobre o plástico para obter um filme bem fino; depois, sombreariamos a sílica, vaporizando ouro em ângulo contra ela, de forma

que todas as letras apareçam claramente; dissolveríamos o plástico do filme de sílica; e então olharíamos através do filme com um microscópio eletrônico!

Não há dúvida de que, se tudo fosse reduzido 25 mil vezes na forma de letras em alto-relevo no alfinete, hoje seria fácil para nós lermo-las. Além disso, não há dúvida de que acharíamos fácil fazer cópias da matriz; precisaríamos apenas de pensar a mesma placa de metal contra o plástico e teríamos outra cópia.

COMO ESCRREVEMOS PEQUENO?

A próxima questão é: como escrevemos isso? Não temos nenhuma técnica padrão para fazê-lo agora. Mas deixem-me argumentar que não é tão difícil como pode parecer à primeira vista. Podemos inverter as lentes de um microscópio eletrônico, de forma que ele passe a reduzir tão bem quando amplie. Uma fonte de íons, enviada através das lentes de um microscópio invertido, poderia ser focalizada em um ponto muito pequeno. Poderíamos escrever com esse ponto, como escrevemos com um osciloscópio de raios catódicos de TV, caminhando por linhas, e com um ajuste que determinaria a quantidade de material que seria depositada enquanto corremos sobre as linhas.

Este método pode ser muito lento, por causa das limitações de espaço para carga. Haverá métodos mais rápidos. Poderíamos primeiro fazer, talvez através de algum processo fotográfico, um anteparo com orifícios em forma de letras. Então, dispararíamos um arco elétrico atrás dos buracos e faríamos passar íons metálicos através deles; depois, poderíamos novamente usar nosso sistema de lentes e fazer uma imagem pequena na forma de íons, que depositariam o metal no alfinete.

Uma maneira mais simples poderia ser esta (ainda que eu não esteja certo de que funcionaria): através de um microscópio óptico invertido, focalizamos luz sobre uma superfície fotoelétrica muito pequena. Então, os elétrons escapam da superfície, a partir do ponto que a luz está iluminando. Esses elétrons são focalizados pelas lentes de um microscópio eletrônico, para chocar-se diretamente contra a superfície do metal. Tal feixe escavará o metal se funcionar por tempo suficiente? Eu não sei. Se não funcionar para uma superfície metálica, pode ser possível encontrar uma superfície com a

qual se cubra o alfinete original e tal que, quando os elétrons a bombardeiem, ocorra alguma mudança que possamos reconhecer mais tarde.

Não há problema nesses dispositivos com relação à intensidade – ao contrário do que você está acostumado na ampliação, onde você tem que pegar uns poucos elétrons e espalhá-los sobre um anteparo cada vez maior; é justamente o contrário. A luz que obtemos de uma página é concentrada em uma área muito pequena, e por isso é muito intensa. Os poucos elétrons que vêm da superfície fotoelétrica são reduzidos a uma área bem diminuta, de forma que, novamente, são muito intensos. Não sei por que isso não foi feito antes!

Isso quanto à Enciclopédia Britânica na cabeça de um alfinete; mas vamos considerar todos os livros do mundo. A Biblioteca do Congresso (norte-americano) tem aproximadamente 9 milhões de volumes; a Biblioteca do Museu Britânico tem 5 milhões de volumes; há também 5 milhões de volumes na Biblioteca Nacional na França. Indubitavelmente, há duplicações; portanto, digamos que há cerca de 24 milhões de volumes de interesse no mundo.

O que aconteceria se eu imprimisse tudo isso na escala sobre a qual vimos discutindo? Quanto espaço vai ocupar? Ocuparia, claro, a área de cerca de um milhão de alfinetes, porque, em vez de haver apenas os 24 volumes da enciclopédia, haveria 24 milhões de volumes. Um milhão de cabeças de alfinete podem ser postas em um quadrado de mil alfinetes de lado, ou uma área de cerca de três jardas quadradas (cerca de 2,5 metros quadrados). Ou seja, a réplica de sílica com o recobrimento de plástico da espessura de um papel, com a qual fizemos as cópias, com toda essa informação, está em uma área de aproximadamente o tamanho de 35 páginas da enciclopédia. Isto é cerca de metade da quantidade de páginas que há nesta revista. Toda a informação que toda a humanidade já registrou em livros pode ser transferida para um panfleto em sua mão – e não escrita em código, mas uma simples reprodução das imagens e estampas originais e tudo o mais em uma escala pequena, sem perda de resolução.

O que diria nossa bibliotecária no Caltech, enquanto ela circula pelo acervo, se eu lhe disser que daqui a dez anos toda a informação que ela está lutando para não perder de vista – 120 mil volumes, empilhados do chão até o teto, gavetas cheias de fichas, depósitos cheios de livros antigos – poderá

ser armazenada em uma única ficha! Quando a Universidade do Brasil, por exemplo, descobrir que sua biblioteca foi incendiada, podemos enviar-lhes uma cópia de cada livro em nossa biblioteca tirando uma réplica da placa-matriz em umas poucas horas e enviando-a em um envelope não maior nem mais pesado do que qualquer outra carta comum por via aérea.

Agora, o título dessa palestra é “Há mais espaços lá embaixo” – não apenas “Há espaço lá embaixo”. O que eu demonstrei é que há espaço – que você pode diminuir o tamanho das coisas de uma maneira prática. Eu agora quero mostrar que há *muito* espaço. Não vou discutir agora como faremos isso, mas somente o que é possível em princípio – em outras palavras, o que é possível de acordo com as leis da física. Não estou inventando a anti-gravidade, que será possível um dia apenas se as leis não sejam as que nós pensamos. Estou dizendo a vocês o que poderíamos fazer se as leis fossem as que pensamos; ainda não o estamos fazendo simplesmente porque ainda não chegamos lá.

INFORMAÇÃO EM ESCALA PEQUENA

Suponha que, ao invés de tentarmos reproduzir as imagens e toda a informação diretamente em sua forma presente, escrevamos apenas o conteúdo de informação em um código de pontos e traços ou algo do tipo, para representar as várias letras. Cada letra representa seis ou sete *bits* de informação; isto é, você precisa de apenas cerca de seis ou sete pontos ou traços para cada letra. Agora, em vez de escrever tudo na superfície da cabeça de um alfinete, como fizemos antes, vou usar também o interior do material. Representemos um ponto por uma pequena marca de metal, o próximo traço por uma marca adjacente feita de outro metal, e assim por diante. Suponha, para mantermos os pés no chão, que um *bit* de informação necessitará de um pequeno cubo de 5 por 5 por 5 átomos – ou seja, 125 átomos. Talvez precisemos de uns cento e poucos átomos para termos certeza de que a informação não foi perdida por difusão ou algum outro processo.

Eu estimei quantas letras existem na enciclopédia e supus que cada um dos meus 24 milhões de livros é tão grande quanto um de seus volumes, e calculei, então, quantos *bits* de informação existem (10^{15}). Para cada *bit* , eu deixo 100 átomos. E o resultado é que toda a informação que o homem

cuidadosamente acumulou em todos os livros do mundo pode ser escrita desta forma em um cubo de material com um ducentésimo de polegada de largura – que é a menor partícula de poeira que pode ser distinguida pelo olho humano. Assim, há muito espaço lá embaixo! Não me falem de microfimes!

Este fato – que quantidades enormes de informação podem ser colocadas em um espaço extraordinariamente pequeno – é, evidentemente, bem conhecido dos biólogos, e resolve o mistério que existia antes de compreendermos tudo isso claramente, ou seja, como podia ser que, na mais diminuta célula, toda a informação para a organização de uma criatura complexa como nós mesmos podia estar armazenada. Toda essa informação – se temos olhos castanhos, se raciocinamos, ou que no embrião o osso da mandíbula deveria se desenvolver inicialmente com um pequeno orifício do lado, de forma que mais tarde um nervo poderia crescer através dele – toda essa informação está contida em uma fração minúscula da célula, em forma de uma longa cadeia de moléculas de DNA, na qual aproximadamente 50 átomos são usados para cada *bit* de informação sobre a célula.

MELHORES MICROSCÓPIOS ELETRÔNICOS

Se eu escrevi em código, usando 5 por 5 por 5 átomos para um *bit*, a pergunta é: como eu poderia ler isso hoje? O microscópio eletrônico não é bom o suficiente; com o maior cuidado e esforço, ele pode resolver apenas até cerca de 10 angstroms. Eu gostaria de tentar e transmitir a vocês, enquanto estou falando de todas essas coisas em escala pequena, a importância de melhorar o microscópio eletrônico cem vezes. Não é impossível; não está contra as leis da difração do elétron. O comprimento de onda do elétron em um tal microscópio é de apenas 1/20 de um angstrom. Assim, deveria ser possível ver os átomos individuais. Que vantagem haveria em distinguir os átomos individuais?

Temos amigos em outros campos – em biologia, por exemplo. Nós, físicos, freqüentemente os vemos e dizemos: “Vocês sabem a razão pela qual seus camaradas estão fazendo tão pouco progresso?” (Na verdade, não conheço nenhum campo onde estão progredindo mais rápido que na biologia hoje.) “Vocês deveriam usar mais matemática, como nós.” Eles poderiam responder – mas eles são educados, então eu vou responder por eles: “O

que vocês poderiam fazer por nós para progredirmos mais rapidamente é fazer um microscópio eletrônico 100 vezes melhor.”

Quais são os problemas mais centrais e fundamentais da biologia hoje? Há perguntas do tipo: qual é a seqüência de bases no DNA? O que acontece quando há uma mutação? Como a ordem das bases no DNA está relacionada com a ordem dos aminoácidos nas proteínas? Qual é a estrutura do RNA; é uma cadeia simples ou dupla, e como a ordem de suas bases está relacionada ao DNA? Qual é a organização dos microssomos? Como as proteínas são sintetizadas? Onde entra o RNA? Como atua? Onde entram as proteínas? Qual o papel dos aminoácidos? Na fotossíntese, onde entra a clorofila; como está disposta; onde estão os carotenóides envolvidos? Qual é o sistema de conversão da luz em energia química?

É fácil responder a muitas dessas questões biológicas fundamentais; você simplesmente olha para a coisa! Você verá a ordem de bases na cadeia; você verá a estrutura do microssomo. Infelizmente, os microscópios atuais vêm em uma escala apenas um pouco tosca demais. Faça-se um microscópio cem vezes mais poderoso e muitos problemas da biologia se tornariam muito mais fáceis. Eu exagero, claro, mas os biólogos estariam certamente muito agradecidos a vocês – e eles prefeririam isso do que a crítica de que deveriam usar mais matemática.

A teoria atual dos processos químicos é baseada na física teórica. Neste sentido, a física provê o fundamento da química. Mas a química também tem análise. Se você tem uma substância estranha e você quer saber o que é, você passa por um longo e complicado processo de análise química. Hoje você pode analisar quase qualquer coisa; então, estou um pouco atrasado com minha idéia. Mas, se os físicos quisessem, eles poderiam também “cutucar” o problema da análise química. Seria muito fácil fazer uma análise de qualquer substância química complexa; tudo o que teria que se fazer seria olhá-la e ver onde os átomos estão. O único problema é que o microscópio eletrônico é cem vezes pobre demais. (Depois, eu gostaria de colocar a questão: poderão os físicos fazer algo a respeito do terceiro problema da química – a síntese? Há algum meio físico para sintetizar uma substância química?)

A razão pela qual o microscópio eletrônico é tão fraco é que o número f das lentes é apenas de uma parte em 1000; você não tem uma abertura

grande o suficiente. E eu sei que há teoremas que provam que é impossível, com lentes de campo estacionário axialmente simétricas, produzir um número f maior do que isso; e, portanto, o poder de resolução hoje está no seu máximo teórico. Mas em qualquer teorema há suposições. Por que o campo deveria ser simétrico? Eu coloco isso como um desafio: Não há nenhuma maneira de fazer um microscópio eletrônico mais poderoso?

O MARAVILHOSO SISTEMA BIOLÓGICO

O exemplo biológico de escrever informação em uma escala pequena inspirou-me a pensar em algo que pudesse ser possível. A biologia não é simplesmente escrever informação; é fazer algo com ela. Várias das células são muito pequenas, mas podem ser muito ativas; elas fabricam várias substâncias; deslocam-se; vibram; e fazem todos os tipos de coisas maravilhosas – tudo em uma escala muito pequena. Além disso, armazenam informação. Considerem a possibilidade de que nós também possamos construir algo muito pequeno que faça o que queiramos – que possamos fabricar um objeto que manobra naquele nível!

Pode haver inclusive aspectos econômicos com relação a essa atividade de fazer coisas muito pequenas. Deixem-me lembrá-los de alguns problemas dos computadores. Nessas máquinas, temos que armazenar uma enorme quantidade de informação. O tipo de escrita que eu mencionava antes, na qual eu tinha tudo como uma configuração de metal, é permanente. Muito mais interessante para um computador é uma forma de escrever, apagar e escrever outra coisa. (Isso, em geral porque não queremos desperdiçar o material sobre o qual já escrevemos. Mesmo que pudéssemos escrevê-lo em um espaço muito pequeno, não faria nenhuma diferença; poderia simplesmente ser jogado fora depois que lido. Não custa muito para o material).

MINIATURIZANDO O COMPUTADOR

Eu não sei como fazer isso em uma escala pequena de uma maneira prática, mas eu sei que os computadores são bem grandes; eles preenchem cômodos inteiros. Por que não poderíamos fazê-los muito *pequenos*, fazê-los de pequenos fios, pequenos elementos – e, por pequeno, eu quero dizer

pequeno. Por exemplo, os fios deveriam ter 10 ou 100 átomos de diâmetro, e os circuitos deveriam ter uns poucos milhares de angstroms de largura. Todo mundo que já tenha analisado a teoria lógica dos computadores já chegou à conclusão de que as possibilidades dos computadores são muito interessantes – se eles puderem tornar-se mais complexos em várias ordens de grandeza. Se eles tivessem milhões de vezes mais elementos, poderiam fazer julgamentos. Teriam tempo para calcular qual é o melhor caminho para fazer um cálculo que estejam prestes a executar. Selecionariam o método de análise que, de sua experiência, seja melhor do que o que lhes fornecemos. E, de muitas outras formas, eles teriam muitos aspectos qualitativos novos. Se eu olho para a sua face, eu reconheço imediatamente o que eu havia visto antes. (Na verdade, meus amigos diriam que eu escolhi um exemplo ruim como ilustração. Pelo menos, eu reconheço que é um homem e não uma maçã.) Mas não há nenhuma máquina que, com essa velocidade, possa pegar a imagem de uma face e dizer nem mesmo que é um homem; e muito menos que é o mesmo homem que você mostrou antes – a menos que seja exatamente a mesma imagem. Se a face é alterada; se estou mais perto da face; se estou mais longe; se muda a luz – eu reconheço-a. Agora, este pequeno computador que eu carrego em minha cabeça é facilmente capaz de fazer isso. Já os computadores que construímos não são. O número de elementos nesta minha caixa óssea é enormemente maior do que o número de elementos em nossos computadores “maravilhosos”. Mas nossos computadores mecânicos são muito grandes; os elementos nesta caixa são microscópicos. Eu quero fazer alguns *submicroscópicos*.

Se quiséssemos fazer um computador que tivesse todas essas maravilhosas habilidades qualitativas extras, teríamos que fazê-lo, talvez, do tamanho do Pentágono. Isso tem várias desvantagens. Primeiro, precisa de muito material; pode não haver germânio suficiente no mundo para todos os transistores que teriam que ser colocados nessa coisa enorme. Há também o problema da geração de calor e consumo de potência; seria necessário TVA para fazer o computador funcionar. Mais uma dificuldade ainda mais prática é que o computador seria limitado a uma certa velocidade. Por causa de seu grande tamanho, é requerido um tempo finito para levar a informação de um lugar a outro. A informação não pode viajar mais rápido do que a velocidade da luz – assim, em última análise, à medida que nossos computadores tornam-se mais e mais rápidos e mais e mais elaborados, teremos que fazê-los menores e menores.

Mas há muito espaço para fazê-los menores. Não há nada que eu possa ver nas leis físicas que diga que os elementos dos computadores não possam ser feitos enormemente menores que são atualmente. Na verdade, pode haver certas vantagens.

MINIATURIZAÇÃO E EVAPORAÇÃO

Como faríamos um equipamento assim? Que tipo de processo de fabricação usaríamos? Uma possibilidade que poderíamos considerar, desde que conversamos sobre escrever e colocar átomos em uma certa disposição, seria vaporizar o material, e então vaporizar o isolante ao seu lado. Então, para a próxima camada, vaporizar outro fio em outra posição, outro isolante, e assim por diante. Assim, você simplesmente vaporiza até que você tenha um bloco que contenha os elementos – bobinas e condensadores, transístores etc – com dimensões extraordinariamente minúsculas.

Mas eu gostaria de discutir, só para nos divertirmos, que existem ainda outras possibilidades. Por que não podemos fabricar esses pequenos computadores da mesma forma que fabricamos os grandes? Por que não podemos furar buracos, cortar, soldar ou estampar coisas, modelar diferentes formas, tudo em um nível infinitesimal? Quais as limitações em relação a quão pequeno algo tem de ser antes que você não consiga mais modelá-la? Quantas vezes, quando você está trabalhando em algo tão frustrantemente minúsculo como o relógio de pulso de sua esposa, você disse a si mesmo: “Ah! se eu pudesse treinar uma formiga para fazer isso!” O que eu gostaria de sugerir é a possibilidade de treinar uma formiga para treinar um ácaro para fazer isso. Quais as possibilidades para máquinas diminutas, porém móveis? Elas podem ou não ser úteis, mas certamente seria muito divertido fazê-las.

Considerem qualquer máquina – por exemplo, um automóvel – e perguntem-se sobre os problemas de se replicar uma tal máquina em escala infinitesimal. Suponham, no *design* particular de um automóvel, que nós precisemos de uma certa precisão em relação aos componentes; precisamos de uma exatidão de, digamos, 4/10 mil de polegada. Se as coisas forem mais imprecisas do que isso na forma de um cilindro ou outras formas, não vai funcionar muito bem. Se eu faço muito pequeno, eu tenho de me preocupar

com o tamanho dos átomos; não posso fazer um círculo de “bolas”, por assim dizer, se o círculo é muito pequeno. Assim, se eu cometer um erro correspondente a 4/10 mil de polegada, que corresponderá a um erro de 10 átomos, resulta que eu posso reduzir as dimensões de um automóvel em aproximadamente 4 mil vezes – de forma que ele fica com um milímetro de comprimento. Obviamente, se você redesenha o carro de modo que ele funcione dentro de uma faixa de tolerância muito maior, o que não é de todo impossível, você poderia obter um equipamento muito menor.

É interessante considerar quais seriam os problemas em máquinas tão pequenas. Primeiramente, em componentes tensionadas no mesmo grau, as forças crescem como a área que você está reduzindo, de forma que coisas como peso ou inércia são relativamente sem importância. A resistência do material, em outras palavras, é proporcionalmente muito maior. As tensões e a expansão do volante do motor sob as forças centrífugas, por exemplo, estariam na mesma proporção apenas se a velocidade de rotação aumentasse na mesma proporção em que diminuimos o tamanho. Por outro lado, os metais que usamos têm uma estrutura granular, e isso causaria muitos aborrecimentos em uma escala pequena, já que o material não é homogêneo. Plásticos, vidros e coisas de natureza amorfa semelhante são muito mais homogêneos e, assim, teríamos de fazer nossas máquinas a partir de tais materiais.

Há problemas associados com as partes elétricas do sistema – com os fios de cobre e os componentes magnéticos. As propriedades magnéticas, em uma escala muito pequena, não são as mesmas que em uma escala maior; há o problema do “domínio” envolvido. Um grande magneto feito de milhões de domínios pode ser reproduzido em escala pequena com até um único domínio, apenas. O equipamento elétrico não será só redimensionado; terá de ser redesenhado. Mas eu não vejo razão por que ele não possa ser redesenhado de forma a poder funcionar novamente.

PROBLEMAS DE LUBRIFICAÇÃO

A lubrificação envolve algumas questões interessantes. A viscosidade efetiva do óleo seria cada vez mais alta à medida que diminuimos a escala (e se aumentamos a velocidade tanto quanto possamos). Se não aumentamos tanto a velocidade, e substituímos o óleo por querosene ou outro fluido, o problema

não parece tão ruim. Mas, na verdade, nós talvez não tenhamos de lubrificá-lo! Temos muita força extra. Deixemos os mancais secos; eles não se aquecerão, porque o calor escapa de dispositivos tão pequenos muito, muito rapidamente.

Esta perda rápida de calor impediria que a gasolina explodisse; assim, seria impossível utilizarmos um motor de combustão interna. Outras reações químicas, que liberem energia a frio, poderiam ser usadas. Provavelmente, uma fonte externa de eletricidade seria mais conveniente para máquinas tão pequenas.

Qual seria a utilidade de tais máquinas? Quem sabe? Naturalmente, um pequeno automóvel seria útil apenas para os ácaros passearem, e eu suponho que nossas inclinações de bom samaritano não cheguem a tanto. Entretanto, nós enfatizamos a possibilidade da fabricação de pequenos elementos para computadores em fábricas totalmente automatizadas, contendo tornos e outras ferramentas em escala muito pequena. O pequeno torno não precisaria ser exatamente como o nosso grande torno. Deixo para sua imaginação os aperfeiçoamentos do *design* que possam ser mais vantajosos para as propriedades de objetos em pequena escala, e de forma que fique mais fácil dar conta da necessidade de automatização.

Um amigo meu (Albert R. Hibbs) sugere uma possibilidade muito interessante para máquinas relativamente pequenas. Ele diz que, embora seja uma idéia bastante selvagem, seria interessante se, numa cirurgia, você pudesse engolir o cirurgião. Você coloca o cirurgião mecânico dentro da veia, e ele vai até o coração e “dá uma olhada” em torno. (Naturalmente, a informação tem que ser transmitida para fora.) Ele descobre qual é a válvula defeituosa, saca uma pequena faca e corta-a fora. Outras máquinas pequenas poderiam ser permanentemente incorporadas ao organismo para assistir algum órgão deficiente.

Agora vem a questão interessante: como fazemos um mecanismo tão pequeno? Deixo isso para vocês. Entretanto, deixem-me sugerir uma possibilidade estranha. Você sabe, nas usinas atômicas eles têm materiais e máquinas que não podem ser manuseadas diretamente, porque tornaram-se radioativos. Para desparafusar porcas, colocar parafusos, etc., eles têm um conjunto de mãos mestres e servas, de forma que, operando um conjunto de

alavancas aqui, você controla as “mãos” lá, pode virá-las para lá e para cá, e assim você pode manusear as coisas confortavelmente.

Grande parte desses dispositivos são, na verdade, feitos de modo bastante simples, no sentido de que há um cabo específico, como um cordão de marionete, que vai diretamente dos controles até as “mãos”. Mas, é claro, eles também fizeram isso usando servomotores, de forma que a conexão entre uma coisa e outra fosse mais elétrica que mecânica. Quando você manuseia as alavancas, elas acionam um servomotor, o que altera as correntes elétricas nos fios, que reposicionam um motor na outra extremidade.

Agora, eu quero fazer reproduzir o mesmo dispositivo – um sistema servo-mestre que opera eletricamente. Mas eu quero que os servos sejam feitos de forma particularmente cuidadosa por operadores modernos em escala grande, de forma que eles tenham um quarto do tamanho das “mãos” que você normalmente manobra. Assim, você tem um esquema com o qual você pode produzir coisas numa escala reduzida em quatro vezes – os pequenos servomotores com pequenas mãos operam com pequenas porcas e parafusos; fazem pequenos buracos; eles são quatro vezes menores. Ahá! Assim, eu produzo um torno quatro vezes menor; ferramentas quatro vezes menores; e produzo, em escala quatro vezes menor, ainda outro conjunto de mãos, por sua vez mais quatro vezes menores. Isso dá um dezesseis avos do tamanho, do meu ponto de vista. Depois de acabar isso, eu passo diretamente do meu sistema em escala grande, talvez usando transformadores, para os servomotores 16 vezes menores. Logo, eu posso manipular as mãos 16 vezes menores.

Bem, a partir disso, vocês têm os princípios. É um programa um tanto difícil, mas é uma possibilidade. Você poderia dizer que pode-se ir mais longe em um único estágio do que por etapas. Naturalmente, tudo isso deve ser desenhado de forma muito cuidadosa, e não é necessário fazê-lo apenas como mãos. Se você pensar sobre isso com cuidado, você provavelmente chegaria em um sistema muito melhor.

Se você trabalhar com um pantógrafo, mesmo hoje, você pode conseguir um fator muito melhor do que quatro em um único passo. Mas você não pode trabalhar diretamente com um pantógrafo que faz um pantógrafo menor, que então faz um pantógrafo ainda menor – por causa da imprecisão dos

buracos e irregularidades da construção. A extremidade do pantógrafo oscila de forma relativamente mais irregular do que o movimento de suas mãos. Diminuindo essa escala, eu veria a extremidade do pantógrafo na extremidade do pantógrafo na extremidade do pantógrafo sacudindo tanto que não estaria fazendo nada de aproveitável.

Em cada etapa, é necessário aumentar a precisão do equipamento. Se, por exemplo, tendo feito um pequeno torno com um pantógrafo, constatarmos que seu parafuso está irregular – mais irregular do que o na escala grande – poderíamos pegar o parafuso e uma porca e lapidá-los um contra o outro, virando para a frente e para trás da maneira usual, até que o parafuso esteja, em sua escala, tão preciso quanto nossos parafusos originais na nossa escala.

Podemos fazer superfícies planas esfregando superfícies não-planas três a três, e as superfícies se tornariam mais planas que a original. Assim, não é impossível melhorar a precisão em escala pequena usando as operações adequadas. Desta forma, quando construímos esses dispositivos, é necessário, em cada passo, aumentar a precisão do equipamento, trabalhando por algum tempo em escala pequena, produzindo parafusos precisos, blocos de Johansen e todos os demais materiais que usamos em trabalhos de precisão no nível grande. Temos que parar em cada nível e fabricar todas as peças para chegar ao próximo nível – um programa muito longo e difícil. Talvez você possa imaginar uma maneira melhor para chegar mais depressa à escala pequena.

Ainda assim, depois de tudo isso, você apenas obteve um pequeno torno-bebê quatro mil vezes menor do que o normal. Mas estávamos pensando em fazer um computador enorme, que construiríamos fazendo buracos com esse torno, para fazer pequenas arruelas para o computador. Quantas arruelas você poderia fabricar com esse único torno?

MIL PEQUENAS MÃOS

Quando eu faço meu primeiro conjunto de “mãos” servas na escala quatro vezes menor, vou fazer dez conjuntos. Faço dez conjuntos de “mãos” e eu as conecto às minhas alavancas originais, de forma que cada uma delas faça exatamente a mesma coisa ao mesmo tempo e em paralelo. Agora, quando estou fazendo meus novos dispositivos novamente quatro vezes menores,

deixo cada um deles produzir dez cópias, e assim terei cem “mãos” em uma escala de 1/16. Onde colocarei o milhão de tornos que terei? Por que, não tem nada de mais; o volume é muito menor do que o de um único torno em escala normal. Por exemplo, se eu fiz um bilhão de pequenos tornos, cada um deles em uma escala de 1/4.000 do torno normal, haverá considerável quantidade de materiais e espaço disponíveis, porque, no bilhão de pequenos tornos, há menos do que 2% do material usado no grande.

Não custa nada em termos de materiais, vocês podem ver. Assim, quero construir um bilhão de pequenas fábricas, modelos umas das outras, que estão simultaneamente produzindo, fazendo buracos, juntando componentes, etc.

À medida que diminuimos o tamanho, há um número de problemas interessantes que vão surgindo. As coisas não reduzem a escala simplesmente de forma proporcional. Há o problema de que os materiais unem-se pelas atrações intermoleculares (van der Waals). Seria algo como isso: depois que você fabrica um componente e desparafusa uma porca, ele não cairá, porque a gravidade não é apreciável; seria mesmo mais difícil tirá-lo do parafuso. Seria como aqueles velhos filmes com um homem tentando se livrar de um copo d'água com mãos cheias de melado. Haverá vários problemas dessa natureza com os quais deveremos estar prontos para lidar.

REARRANJANDO OS ÁTOMOS

Mas não tenho medo de considerar a questão final em relação a se, em última análise – no futuro longínquo –, poderemos arranjar os átomos da maneira que queremos; os próprios átomos, no último nível de miniaturização! O que aconteceria se pudéssemos dispor os átomos um por um da forma como desejamos (dentro do razoável, é claro; você não pode dispô-los de forma que, por exemplo, sejam quimicamente instáveis).

Até agora, nós nos contentamos em escavar o chão para encontrar minerais. Nós os aquecemos e fazemos coisas com eles em escala grande, e esperamos obter uma substância pura a partir de tanta impureza, e assim por diante. Mas temos sempre de aceitar alguns arranjos atômicos que a natureza nos dá. Não temos nada como, digamos, um arranjo do tipo “tabuleiro de

damas”, com os átomos de impureza dispostos exatamente 1.000 angstroms uns dos outros, ou em algum outro padrão específico.

O que poderíamos fazer com estruturas em camadas se tivéssemos exatamente as camadas corretas? Quais seriam as propriedades dos materiais se pudéssemos realmente arranjar os átomos como bem entendêssemos? Elas seriam muito interessantes de se investigar teoricamente. Não posso ver exatamente o que aconteceria, mas dificilmente posso duvidar que, quando tivermos algum controle sobre a disposição das coisas na escala pequena, teremos um leque enormemente maior de propriedades possíveis para as substâncias, e de diferentes coisas que poderíamos fazer.

Considere, por exemplo, um pedaço de material no qual fazemos pequenas bobinas e condensadores (ou seus análogos do estado sólido) de 1.000 ou 10.000 angstroms em um circuito, um exatamente ao lado do outro, sobre uma área extensa, com pequenas antenas espetadas na outra extremidade – toda uma série de circuitos. É possível, por exemplo, emitir luz de todo um conjunto de antenas, como emitimos ondas de rádio de um conjunto organizado de antenas para transmitir programas para a Europa? O mesmo aconteceria para transmitir luz de intensidade muito alta em uma direção definida. (Talvez tal transmissão não seja muito útil técnica ou economicamente).

Tenho pensado sobre alguns dos problemas relativos à construção de circuitos elétricos em escala pequena, e o problema da resistência é sério. Se você faz um circuito correspondente em escala pequena, sua frequência natural aumenta, uma vez que o comprimento de onda diminui com a escala; mas a profundidade de penetração do campo eletromagnético decresce só com a raiz quadrada da escala e, assim, os problemas de resistência apresentam dificuldade crescente. Possivelmente, podemos dar conta da resistência usando a supercondutividade, se a frequência não é demasiadamente alta, ou por outros artifícios.

ÁTOMOS NO MUNDO PEQUENO

Quando vamos ao mundo muito, muito pequeno – digamos, circuitos de sete átomos – acontecem uma série de coisas novas que significam

oportunidades completamente novas para *design*. Átomos na escala pequena não se comportam como nada na escala grande, pois eles seguem as leis da mecânica quântica. Assim, à medida em que descemos de escala e brincamos com os átomos, estaremos trabalhando com leis diferentes, e poderemos esperar fazer coisas diferentes. Podemos produzir de formas diferentes. Podemos usar não apenas circuitos, mas algum sistema envolvendo os níveis quantizados de energia, ou as interações entre spins quantizados, etc.

Outra coisa que constataremos é que, se formos longe o bastante, todos os nossos dispositivos poderão ser produzidos em massa, de forma que serão réplicas absolutamente perfeitas uns dos outros. Não podemos fazer duas máquinas grandes de forma a que as dimensões sejam exatamente as mesmas. Mas, se a sua máquina tem apenas 100 átomos de altura, você tem de torná-la precisa em apenas meio por cento para ter certeza de que a outra máquina tenha exatamente o mesmo tamanho – ou seja, 100 átomos de altura!

No nível atômico, temos novos tipos de forças e novos tipos de possibilidades, novos tipos de efeitos. Os problemas de fabricação e reprodução de materiais serão bem diferentes. Minha inspiração, como eu disse, vem de fenômenos biológicos, nos quais as forças químicas são usadas de uma forma repetitiva para produzir todo tipo de efeitos estranhos (um dos quais é este autor).

Os princípios da física, tanto quanto podemos perceber, não implicam na impossibilidade de manipular coisas átomo por átomo. Não se trata de uma tentativa de violar quaisquer leis; é algo que, em princípio, pode ser feito, mas, na prática, ainda não o foi, porque nós somos grandes demais.

Em última análise, podemos fazer sínteses químicas. Um químico vem e nos diz: “Olhe, eu quero uma molécula que tenha os átomos dispostos assim e assim; faça-me essa molécula.” O químico faz uma coisa misteriosa quando ele quer obter uma molécula. Ele vê que ela tem tal forma; então ele mistura isso e aquilo, chacoalha e brinca um pouco com aquilo. E, no final de um processo difícil, em geral ele obtém sucesso em sintetizar o que quer. Na altura em que eu conseguir meus dispositivos funcionando, de modo a podermos fazer isso com a física, ele terá descoberto como sintetizar absolutamente qualquer coisa, de forma que isso será completamente inútil.

Mas é interessante que seria possível, em princípio (eu acho), para um físico, sintetizar qualquer substância química que o químico escreva. Dê as ordens e o físico sintetiza. Como? Coloque os átomos ali onde o químico diz; assim, você faz a substância. Os problemas de química e biologia poderão ser bastante reduzidos se nossa habilidade de ver o que estamos fazendo, e de fazer as coisas em nível atômico, for finalmente desenvolvida – um avanço que, penso, não pode ser evitado.

Agora, você pode dizer: “Quem deveria fazer isso e por que deveriam fazê-lo?” Bem, eu mostrei algumas das aplicações econômicas, mas eu sei que a razão pela qual você o faria seria por pura diversão. Mas divirta-se! Vamos fazer uma competição entre laboratórios. Um laboratório faz um pequeno motor, que manda para um outro laboratório, que manda-o de volta com uma coisa que se encaixa no eixo do primeiro motor.

COMPETIÇÃO ESCOLAR

Apenas por diversão, e para provocar interesse por esse campo nas crianças, eu proporia que alguém que tenha algum contato com escolas de ensino médio pensasse em fazer algum tipo de competição escolar. Afinal, nós ainda nem começamos nesse campo, e até mesmo as crianças podem escrever menor do que jamais foi escrito antes. Elas poderiam fazer concursos nas escolas. A escola de Los Angeles poderia enviar um alfinete para uma escola de Veneza, onde estaria escrito: “Como vão as coisas?” Eles recebem de volta o alfinete e, no pingo do “i” está escrito: “Não muito quente”.

Talvez isso não o motive a fazer isso, e apenas a economia poderia fazê-lo. Então, eu gostaria de fazer alguma coisa; mas eu não posso fazê-la agora, pois ainda não preparei o terreno. Pretendo então oferecer um prêmio de US\$ 1 mil para a primeira pessoa que possa pegar a informação na página de um livro e colocá-la em uma área 25 mil vezes menor, em escala linear, de tal forma que ela possa ser lida com um microscópio eletrônico.

E eu gostaria de oferecer um outro prêmio – se eu puder encontrar um jeito de enunciar isso de forma a não me meter em uma confusão de discussões

sobre definições – de outros US\$ 1 mil para a primeira pessoa que fizer um motor elétrico funcional – um motor elétrico rotativo que possa ser controlado de fora e, sem contar os cabos de entrada, tenha 1/64 de polegada cúbica.

Eu não acho que esses prêmios tenham que esperar muito para os candidatos aparecerem.

Nota do editor da Journal of Microelectromechanical Systems: O prêmio acima foi apresentado pelo Dr. Feynman em 28 de novembro de 1960 para William McLellan, que construiu um motor elétrico com o tamanho de um grão de poeira. O outro prêmio ainda está em aberto.

O Autor

RICHARD FEYNMAN (1918-1988). Prêmio Nobel de Física em 1965, Feynman tornou-se um ícone para a física no final do século XX – o primeiro norte-americano a alcançar essa posição. Nascido em Nova York, as contribuições principais de Feynman à física têm a ver com a teoria das interações eletromagnéticas (*Luz*) e a formulação de um princípio variacional da mecânica quântica (*Açã*o).