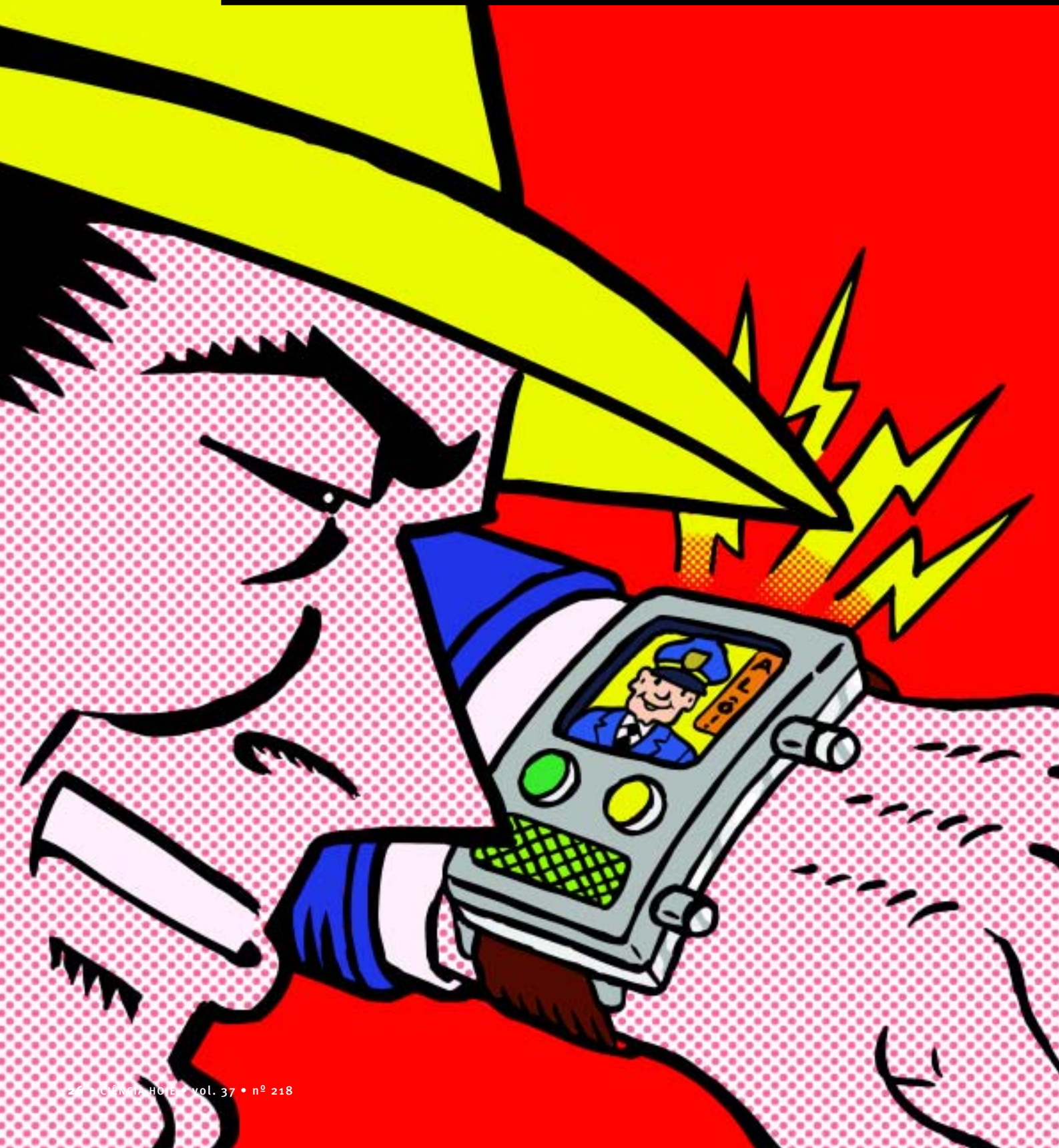




A AVENTURA DA FÍSICA



DA MATÉRIA CONDENSADA

Mesmo o criador de Dick Tracy certamente ficaria surpreso em saber que os relógios de pulso para comunicação de voz e imagem passaram da ficção à realidade em tão pouco tempo. Nem é preciso voltar à década de 1930, quando foi criado esse legendário detetive dos quadrinhos. Há menos de 30 anos, seria difícil acreditar que nosso dia-a-dia estaria repleto de aparelhos eletrônicos como o telefone celular, o DVD (disco de vídeo digital), a câmara fotográfica digital, o computador pessoal, entre outros. E que a comunicação em escala global seria em alta velocidade, através de ondas de rádio se propagando pelo ar ou por meio da luz viajando por fibras ópticas. E isso, em parte, só foi possível graças às descobertas feitas no campo da física da matéria condensada, área que forma a base científica sobre a qual a tecnologia da eletrônica foi desenvolvida na segunda metade do século passado.

Sergio Machado Rezende

Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco

Desde tempos imemoriais, diversas propriedades físicas dos materiais já intrigavam a humanidade. Entre as que mais cedo despertaram a curiosidade dos cientistas estão as propriedades ópticas mais evidentes, como a cor, o brilho, a transparência e a opacidade. As propriedades magnéticas presentes em certos materiais também desafiaram os cientistas por séculos. A própria palavra ‘magnetismo’ surgiu na Antigüidade, associada ao fenômeno pelo qual fragmentos de ferro são atraídos pelo ímã natural, a magnetita (Fe_3O_4), um mineral encontrado na natureza. Sua origem está ligada a Magnésia, nome de uma cidade da Turquia antiga que era rica em minério de ferro.

Os primeiros relatos de experiências com ‘a força misteriosa’ da magnetita datam de 800 a.C. e são atribuídos aos gregos, povo que também descobriu as propriedades elétricas que certos materiais adquirem ao serem esfregados com tecidos, passando a atrair ou repelir objetos leves, como pedaços de folhas secas e penas de aves. O termo elétrico surgiu de *élektron*, nome grego para âmbar, uma resina natural dura da qual eram feitos os bastões usados nas experiências de eletrização.

Ganhando corpo

As manifestações mais evidentes das propriedades ópticas, elétricas, magnéticas e térmicas dos materiais tornaram-se objeto de estudos sistemáticos a partir do Renascimento. Contudo, só no final do século 19 e no início do século passado, elas começaram a ser compreendidas microscopicamente. Isso se deu em função de desenvolvimentos importantes, cabendo destacar:

- i) a formulação de teorias apropriadas – mais especificamente, a termodinâmica e a física estatística – para o estudo de sistemas formados por muitos constituintes, como os gases, feita principalmente pelo físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), pelo escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) e pelo norte-americano Josiah Williard Gibbs (1839-1903);
- ii) a elaboração da tabela periódica dos elementos químicos pelo russo Dimitri Mendeleev (1834-1907), em 1871;
- iii) a formulação de uma teoria que unificava os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos – a teo- ▶



Figura 1. Válvulas a vácuo. À direita, propaganda de 1929 de empresa norte-americana fabricante desse componente para aparelhos de rádio



ria eletromagnética – por Maxwell, em 1873, a partir das descobertas do físico francês André-Marie Ampère (1775-1836), do dinamarquês Hans Oersted (1777-1851) e o inglês Michael Faraday (1791-1867);

iv) a descoberta do elétron pelo inglês Joseph John Thomson (1856-1940) em 1897;

v) a elaboração dos primeiros conceitos de quantização – ou seja, o fato de a energia na natureza ser gerada e absorvida em ‘pacotes’ (*quantum*, no singular) e não como um fluxo contínuo, como se acreditava até então – pelos alemães Max Planck (1858-1947) em 1900 e Albert Einstein (1879-1955) em 1905;

vi) o desenvolvimento do modelo do átomo, entre 1909 e 1913, pelo neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937), que propôs a existência de um ‘caroço’ central (núcleo), e pelo dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), que estabeleceu as regras para explicar como os elétrons giram em torno do núcleo.

A formulação da mecânica quântica por Erwin Schrödinger (1887-1961) e Werner Heisenberg (1901-1971) – em meados da década de 1920 – propiciou a ferramenta teórica para explicar e descrever em detalhes as propriedades dos átomos isolados ou agregados na forma de materiais.

Esses desenvolvimentos formaram o cenário no qual, a partir das décadas de 1930 e 1940, começou a ganhar corpo a física do estado sólido, a área que investiga as propriedades e os fenômenos que ocorrem em materiais sólidos, como resultado da sistematização das observações e medidas experimentais das propriedades dos materiais e sua in-

terpretação teórica com base nas leis do eletromagnetismo, da mecânica quântica e da física estatística.

Nasce o transistor

A eletrônica foi o ramo da tecnologia mais marcante do século passado. Ela surgiu com a invenção, no início daquele século, das válvulas eletrônicas a vácuo, que consistem de um tubo a vácuo – em geral, com uma capa de vidro fino – contendo vários ‘pólos’ (eletrodos). Um deles, o catodo (pólo negativo), ao ser aquecido por um filamento incandescente, emite

elétrons que são dirigidos para o anodo (pólo positivo), passando por outros eletrodos que controlam seu fluxo. Isso possibilita a amplificação ou o processamento de sinais da corrente elétrica, que podem representar sinais de áudio, de vídeo ou de uma informação qualquer (figura 1).

É o fato de os elétrons serem responsáveis pelo processamento das informações nas válvulas que deu origem ao nome eletrônica. Porém, a eletrônica baseada nas válvulas a vácuo tinha grandes limitações e inconvenientes, pois elas eram grandes, frágeis, aqueciam muito, tinham vida curta e fabricação dispendiosa, além de várias desvantagens técnicas. Por essa razão, desde antes da Segunda Guerra Mundial, procurava-se um dispositivo que pudesse substituir as válvulas nos equipamentos eletrônicos.

O grande passo nessa direção foi dado em 1947 pelos norte-americanos John Bardeen (1908-1991), Walter Brattain (1902-1987) e William Shockley (1910-1989), três físicos dos laboratórios da empresa Bell Telephone que estudavam propriedades de condução eletrônica em germânio, um elemento químico que, assim como o silício, tem resistência elétrica intermediária entre a dos condutores e a dos isolantes e, por isso, é chamado semicondutor.

A equipe da Bell descobriu que era possível controlar a corrente elétrica no interior de um material semicondutor, o que possibilitaria fazer um novo dispositivo que eles chamariam transistor – a figura 2 mostra o primeiro a ser construído – e que poderia substituir a válvula a vácuo. Na década de 1950, o transistor foi aperfeiçoado, tornando-se um dispositivo confiável, com aplicações nos mais diversos equipamentos eletrônicos e com custos de fabricação cada vez menores.

A descoberta do transistor propiciou o início de uma completa revolução na eletrônica e na qual os componentes tradicionais dos circuitos foram gradualmente sendo substituídos por novos dispositivos que operavam com base em fenômenos que ocorrem no interior dos materiais sólidos. O transistor estimulou um grande desenvolvimento da física do estado sólido, pois suas conseqüências econômicas ficaram logo evidentes.

Crescente miniaturização

Na década de 1960, ocorreu a miniaturização da eletrônica, com o desenvolvimento dos circuitos integrados, que contêm inúmeros transistores e diodos ('chaves' que só deixam a corrente elétrica passar em um sentido) interligados com resistores (limitadores da intensidade da corrente elétrica) e capacitores (armazenadores de energia elétrica), fabricados na mesma pastilha (*chip*) de semicondutor. A fabricação dos circuitos integrados com elementos de dimensões da ordem de micrômetros (milionésimos de metro ou 10^{-6} metro) deu origem à tecnologia da microeletrônica.

Com a crescente miniaturização dos componentes, surgiram, na década de 1970, os microprocessadores, formados por conjuntos de circuitos integrados de processamento de sinais digitais interligados com memórias para armazenamento de dados (figura 3). Com eles, foi possível fabricar os microcomputadores e inúmeros equipamentos digitais. Desde então, a produção de circuitos integrados e microprocessadores cada vez mais rápidos e com maior número de elementos tem evoluído constantemente na eletrônica, com o aumento da velocidade e capacidade de processamento e armazenagem de informações.

Ainda em 1965, o norte-americano Gordon Moore, que mais tarde seria um dos criadores da empresa Intel, a gigante indústria de microprocessadores, observou que o número de transistores em um *chip* de circuito integrado dobrava a cada 18 meses. Ele previu que essa taxa seria

mantida nas décadas seguintes, o que efetivamente aconteceu, passando a ser conhecida como a lei de Moore (figura 4).

Além dos dispositivos eletrônicos baseados nos semicondutores, surgiram outros que deram à eletrônica uma enorme versatilidade e variedade de aplicações. Entre os mais importantes, cabe destacar:

- i) os *lasers*, que têm inúmeras aplicações na indústria e na medicina e propiciaram o advento das comunicações ópticas;
- ii) os novos materiais e dispositivos magnéticos que são usados para a gravação de informação e que estão tendo enorme impacto nos meios de comunicação e nos computadores;
- iii) os mostradores de cristais líquidos e de diodos emissores de luz com materiais orgânicos (Oleds), que possibilitaram a fabricação de pequenas telas de vídeo para *notebooks*, telefones celulares, câmeras digitais, entre outros aparelhos.

O funcionamento desses dispositivos é baseado em propriedades e fenômenos de materiais, e seu desenvolvimento só foi possível graças ao conhecimento acumulado com as atividades de pesquisa em física do estado sólido.

Figura 2. Primeiro transistor, construído, em 1947, por Bardeen, Brattain e Shockley



Figura 3.
Microprocessador
de última
geração

Condensada e complexa

Até a década de 1950, os trabalhos em física do estado sólido estavam concentrados nos sólidos cristalinos, que são aqueles cujos átomos ou íons constituintes têm um arranjo ordenado periódico – nesses sólidos, ocorrem fenômenos que não existem em materiais amorfos, em que inexistem essa ordem. Além disso, como os sólidos cristalinos têm estrutura com propriedades de simetria bem definidas, os fenômenos podem ser interpretados pelas leis da física com mais facilidade. Com o progresso das técnicas experimentais e teóricas de investigação, essa área se estendeu a materiais mais complexos, como vidros, polímeros orgânicos diversos, ligas amorfas e até os fluidos, passando a ser conhecida como física da matéria condensada.

A física da matéria condensada investiga os estados da matéria em que os átomos constituintes estão suficientemente próximos e interagem simultaneamente com muitos vizinhos. É uma área de investigação básica, na qual, ao contrário de outras da física, a teoria é freqüentemente desenvolvida após a observação experimental de uma propriedade ou fenômeno novo. As técnicas experimentais incluem eletrônica sofisticada, tanto analógica quanto digital, criogenia (manutenção de sistemas a temperaturas baixíssimas) e óptica.

A investigação experimental dos materiais e sua interpretação com base na mecânica quântica e na física estatística levaram à compreensão das propriedades e dos fenômenos de condução elétrica em metais, nos semicondutores e nos supercondutores, o comportamento dos materiais magnéticos, as propriedades ópticas, térmicas, mecânicas, entre outras, de sistemas complexos e novas estruturas artificiais.



A interpretação dos novos fenômenos na matéria condensada tem requerido o uso cada vez mais freqüente de técnicas originadas na física estatística e em teorias sofisticadas desenvolvidas no estudo de partículas elementares. Esse fato tem contribuído para que essa área atraia físicos teóricos do mais alto calibre, que, por sua vez, desenvolvem técnicas novas que encontram aplicações em outras áreas. Por outro lado, o rápido progresso nas técnicas de computação eletrônica tem possibilitado o cálculo quantitativo de inúmeras propriedades dos sólidos a partir das equações mais fundamentais que descrevem os átomos e as moléculas.

INTEL

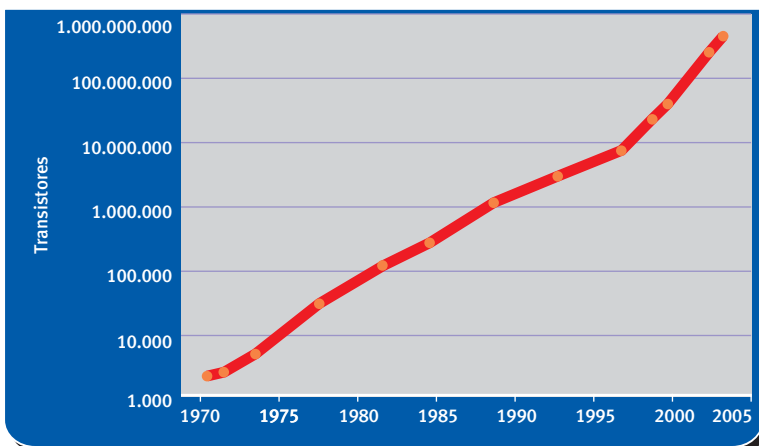
40% dos físicos

Do ponto de vista experimental, uma característica importante da física da matéria condensada é seu caráter descentralizador, pois ela possibilita a investigação de um problema físico de fronteira completo, com laboratórios de custos e dimensões pequenos se comparados aos das grandes máquinas utilizadas na física nuclear e de partículas elementares. Além disso, a grande variedade de técnicas experimentais utilizadas na matéria condensada faz com que essa área seja muito propícia para a formação de técnicos e pesquisadores.

A instrumentação típica usada em matéria condensada encontra aplicações em outros campos da ciência – química, biofísica, geofísica, ciência de materiais, ciências agrárias etc. –, assim como da engenharia e medicina. Entre os exemplos mais notáveis, estão a tomografia por ressonância magnética nuclear e a endoscopia óptica, que estão causando um enorme impacto nos procedimentos médicos de diagnósticos não invasivos.

Não foi só por causa de sua importância tecnológica que a física da matéria condensada se expandiu e se desenvolveu muito nas últimas décadas. Ela é atualmente uma das áreas mais estimulantes da ciência, contribuindo continuamente para a descoberta de novos fenômenos fundamentais e de novos materiais avançados (ver 'Principais avanços'). Essa é uma das razões por que cerca de metade dos prêmios Nobel de Física nas últi-

Figura 4.
Lei de Moore
demonstrada
em gráfico
no qual está
relacionado
o ano de
desenvolvimento
dos modelos de
microprocessadores
em função
do número
de transistores



PRINCIPAIS AVANÇOS

A cada ano, na área de física da matéria condensada, surgem novas linhas de pesquisa, impulsionadas pela descoberta de novas propriedades, novos fenômenos e novos materiais artificiais. Estes, por sua vez, abrem o potencial para o desenvolvimento de novos dispositivos que encontram aplicações nos mais variados segmentos tecnológicos e cujo interesse econômico impulsiona as pesquisas básica e aplicada.

Entre os principais avanços dos últimos anos, podem-se destacar:

- i) a descoberta do efeito Hall quântico, no qual a resistência elétrica de um material, mantido a baixíssimas temperaturas e sob a ação de um campo magnético, varia aos ‘saltos’ e não de modo contínuo;
- ii) a síntese a temperaturas mais altas de materiais que não oferecem resistência à passagem da corrente elétrica, os chamados supercondutores;
- iii) a descoberta e interpretação de diversos fenômenos envolvendo elétrons fortemente correlacionados, encontrados em ligas metálicas contendo certos elementos com momentos magnéticos, como ferro, níquel, paládio, cério, entre outros.
- iv) o desenvolvimento de estruturas de semicondutores e de materiais magnéticos fabricados pela deposição sucessiva de monocamadas atômicas, formando super-redes, estruturas heterogêneas (heteroestruturas) ou poços quânticos – estes últi-

mos podem ser comparados a armadilhas para aprisionar partículas;

v) a identificação e compreensão de fenômenos críticos, transições de fase, a formulação teórica e a observação experimental de fenômenos de turbulência e caos em uma grande variedade de sistemas;

vi) a descoberta de processos pelos quais os elétrons são controlados, não por sua carga elétrica, mas sim por seu *spin* (propriedade responsável pelo surgimento do magnetismo), dando origem à tecnologia de spintrônica;

vii) a descoberta de polímeros orgânicos que conduzem eletricidade e emitem luz.

Nas últimas décadas, as técnicas experimentais de fabricação possibilitaram a preparação de filmes ultrafinos, nos quais os átomos são depositados sobre um substrato quase individualmente, possibilitando a construção de estruturas na escala de nanômetro (um bilionésimo de metro ou 10^{-9} m). Isso tornou a física da matéria condensada um dos pilares da nanociência e da nanotecnologia, abrindo enormes possibilidades de aplicações em outros campos da ciência e da tecnologia.

No Brasil, grupos de matéria condensada vêm trabalhando e publicando em vários temas de fronteira, como super-redes, pontos e poços quânticos de semicondutores, efeito Hall quântico, hélio superfluido, nanoestruturas magnéticas, fenômenos críticos e transições de fase, dinâmica não linear, turbulência e caos, sistemas fortemente correlacionados e supercondutividade.

mas três décadas tenha sido conferida a físicos que trabalham na área, que atrai o esforço de pesquisa de mais de 40% dos físicos em todo o mundo.

O início no Brasil

O precursor da física da matéria condensada no Brasil foi Bernard Gross (1905-2002), físico alemão que chegou ao país em 1933 para trabalhar no Instituto Nacional de Tecnologia, fundado na cidade do Rio de Janeiro ainda em 1921, como Estação Experimental de Combustíveis e Minérios (figura 5). Um de seus primeiros discípulos foi Joaquim Costa Ribeiro (1906-1960), que, em 1944, descobriu, ao estudar a cera de carnaúba, o efeito termodielétrico (ou efeito Costa Ribeiro), que ocorre no processo de solidificação de dielétricos (substâncias que não conduzem corrente elétrica).

O desenvolvimento inicial da física dos sólidos no Brasil foi muito lento, pois, logo após a Segunda Guerra Mundial, as atenções da física eram voltadas para a área nuclear. Em 1960 – portanto, 10 anos depois da descoberta do transistor e quando o *laser* já existia –, não havia mais do que meia dúzia de físicos de estado sólido no país. Esse contingente estava concentrado em três grupos: o de Costa Ribeiro, no Rio de Janeiro; um recém-criado em São Carlos (SP), por Sérgio Mascarenhas, discípulo de Gross e Costa Ribeiro; e um terceiro, formado a partir de 1953, no Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA), em São José dos Campos (SP). Enquanto os dois primeiros grupos se voltavam para os aspectos acadêmicos e a formação de pessoal, o então denominado ‘Projeto Germânio’, do CTA, se dedicava à extração e à purificação do germânio, com o objetivo de fabricar diodos e transistores em eletrônica compactada. ▶

O primeiro liquefator

O primeiro grande investimento tanto em pessoal quanto em equipamentos foi realizado no início da década de 1960 no antigo Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. Por iniciativa dos físicos teóricos Mário Schenberg (1914-1990) e Newton Bernardes, foi implantado, em 1962, o primeiro liquefator de hélio do país, possibilitando a criação do grupo de Física de Sólidos e Baixas Temperaturas da USP, que atraiu para São Paulo inúmeros estudantes e professores de outras universidades brasileiras e também do exterior.

No resto do país, o crescimento continuou lento na década de 1960, período em que foram criados pequenos grupos em universidades federais, como a de Minas Gerais, do Rio Grande do Sul e do Ceará, bem como na Pontifícia Universidade Católica (PUC) e no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, ambos no Rio de Janeiro. A partir da década seguinte, no entanto, esse quadro começou a mudar rapidamente, com a criação de grupos em várias universidades brasileiras, como na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e na Universidade Federal de Pernambuco. Para isso, foi fundamental a criação da Financiadora de Estudos e

Projetos (Finep) com a visão de seu primeiro presidente, José Pelúcio Ferreira (1928-2002), que entendia que o desenvolvimento tecnológico não poderia existir sem uma ciência básica forte.

Milhões de dólares

Também foram importantes a ambição e a ousadia levadas para a Unicamp por um grupo de brasileiros que estava nos Laboratórios da Bell (Estados Unidos), Sérgio Porto (1926-1979), Rogério Cerqueira Leite e José Ripper Filho. Eles conseguiram levar para o Instituto de Física, recém-criado naquela universidade, dezenas de pesquisadores experimentais com doutorado, apoiados por muitos milhões de dólares – principalmente, concedidos pela Finep – para a montagem de seus laboratórios. A rápida expansão da física na Unicamp provocou profundas mudanças no quadro brasileiro e, a despeito de problemas, teve o mérito de alterar a escala dos investimentos na física da matéria condensada no país.

Na década de 1970, o número de pesquisadores em matéria condensada se multiplicou no país, propiciando a criação de novos grupos em várias regiões e a expansão daqueles que já existiam. Não há dados muito precisos, mas sabe-se que, em 1969, o número de doutores nessa área era inferior a 50. Naquele ano, o primeiro encontro nacional de físicos do estado sólido, organizado por Mascarenhas, em São Carlos, reuniu a totalidade dos doutores da área e não teve mais que 70 participantes. Já em 1981, o levantamento realizado para o documento de 'Avaliação e Perspectivas', do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), constatou a existência de cerca de 300 doutores em física da matéria condensada, o que representava um crescimento por um fator seis em 12 anos.



ARQUIVO DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA / IMAST (UNICAMP)

Figura 5. O físico de origem alemã Bernhard Gross, precursor da física da matéria condensada no Brasil

Luz no túnel

Na década de 1980, a iniciativa de porte mais importante foi a criação do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). Ela foi precedida de um debate acalorado

ELÉTRONS APRISIONADOS EM UM ANEL

A fonte de luz síncrotron é um equipamento considerado de médio a grande porte que produz radiação eletromagnética em uma grande faixa de frequência (ou energia), desde o infravermelho até os raios X. A radiação é proveniente do movimento de elétrons em altíssima velocidade ‘circulando’ no interior de um tubo na forma de um anel. O tubo é mantido em alto vácuo para que não haja colisão dos elétrons com as moléculas de ar ou de qualquer gás.

O movimento dos elétrons resulta da ação de campos elétricos e magnéticos, sendo baseada nos mesmos princípios que atuam em um tubo de televisão ou de monitor de computador. Um catodo aquecido situado na extremidade inicial de um tubo retilíneo evacuado produz o feixe inicial de elétrons, que são acelerados pela ação de campos elétricos. Ao atingir a outra extremidade, os elétrons são defletidos pela ação de campos magnéticos, que têm a propriedade de mudar a trajetória sem alterar a velocidade. Eles são então ‘guiados’ até entrarem no anel de armazenamento, formado por tubos retilíneos, evacuados e conectados uns aos outros constituindo um polígono.

No caso do síncrotron do LNLS, o polígono tem 12 lados e diâmetro médio de 29,7 metros (figura 6). Ao serem injetados no primeiro tubo, os elétrons seguem em linha reta até o final, quando têm sua trajetória alterada bruscamente por um campo magnético, para entrarem alinhados no tubo seguinte. Assim, eles passam sucessivamente de um lado do polígono para o outro, ‘circulando’ ao longo do anel.



Figura 6. Visão geral do anel de armazenamento do LNLS

Ocorre que, cada vez que os elétrons em altíssima velocidade têm sua trajetória alterada bruscamente, eles emitem radiação eletromagnética distribuída em uma grande faixa de frequência, em um efeito conhecido como radiação síncrotron. Dessa forma, em cada vértice do polígono existe uma ‘linha de luz’, em torno da qual são instaladas ‘estações experimentais’, para o processamento da radiação produzida e sua utilização no estudo de átomos, moléculas e todo tipo de material.

Em cada estação, há um sistema de filtros que deixa passar somente radiação em uma certa faixa estreita de frequências, no infravermelho, na luz visível, no ultravioleta ou nos raios X, assim como equipamentos de medidas e análise da resposta da amostra em estudo. A fonte do LNLS tem atualmente 12 estações experimentais.

na comunidade de físicos sobre as vantagens e desvantagens de concentrar um grande investimento em uma única instalação. Mas, quando o Ministério da Ciência e Tecnologia foi criado, em 1985, este logo decidiu implantar o LNLS em Campinas. Por 12 anos, a fonte de luz do LNLS foi projetada e construída por físicos, engenheiros e técnicos brasileiros, com apoio de indústrias brasileiras, sob a liderança do físico Cylon Gonçalves da Silva. O LNLS começou a operar em 1997 e tornou-se o primeiro laboratório de caráter nacional do Brasil, voltado para atender as necessidades de pesquisadores de todo o país e do exterior,

contribuindo não apenas para o desenvolvimento da física da matéria condensada, mas também de áreas como a química, a biologia e a engenharia de materiais (ver ‘Elétrons aprisionados em um anel’).

Nas últimas duas décadas, o aumento do número de pesquisadores e de grupos na área de matéria condensada tem sido progressivo, e ela tornou-se uma das áreas mais desenvolvidas no Brasil. Nela, trabalham atualmente cerca de 50% dos três mil físicos ativos com doutorado no país, publicando artigos científicos nos melhores periódicos internacionais em linhas de fronteira. ■

SUGESTÕES PARA LEITURA

- ANJOS, J. e BARROS, H. *L. Nanociência e nanotecnologia – Modelando o futuro átomo por átomo* (CBPF, Rio de Janeiro, 2003). Disponível em www.cbpf.br/Publicacoes em formato PDF.
- FAZZIO, A. e SILVA, A. J. R. ‘Os alquimistas (virtuais) estão chegando...’ in *Ciência Hoje* (vol. 36, nº 215, maio de 2005).
- GALEMBECK, F., RAMOS, A. F. e GOUVEIA, R. F. ‘Eletricidade estática: onde ficam as cargas?’ in *Ciência Hoje* (vol. 35, nº 208, setembro de 2005).
- KNOBEL, M. ‘Aplicações do magnetismo’ in *Ciência Hoje* (vol. 36, nº 215, maio de 2005).
- REZENDE, S. M. ‘A dança dos spins’ in *Ciência Hoje* (vol. 14, nº 80, março/abril de 1992).
- REZENDE, S. M. *Materiais e dispositivos eletrônicos* (Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2004).