

# C B P F



PUBLICAÇÃO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA DO CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS



# Na vanguarda da pesquisa

PRESIDENTE DA REPÚBLICA  
Fernando Henrique Cardoso

MINISTRO DE ESTADO  
DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
Ronaldo Mota Sardenberg

SECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO  
DAS UNIDADES DE PESQUISA  
João Evangelista Steiner

DIRETOR DO CBPF  
João dos Anjos (interino)

COMISSÃO EDITORIAL  
(em ordem alfabética)  
Alexandre Malta Rossi  
Alberto Passos Guimarães  
Alfredo Ozorio de Almeida  
João dos Anjos  
Ronald Cintra Shellard  
Rosa Scorzelli

EDITOR  
Cássio Leite Vieira

REPORTAGEM  
Renata Ramalho

PROJETO GRÁFICO,  
DIAGRAMAÇÃO, INFOGRÁFICOS  
E TRATAMENTO DE IMAGEM  
Ampersand Comunicação Gráfica  
(ampersan@uol.com.br)

FOTOS DOS GRUPOS  
Flavio Cavalcante

AGRADECIMENTOS  
Ana Maria Ribeiro de Andrade (MAST)  
Antonio Augusto Passos Videira (UERJ)  
Alicia Ivanishevich  
(revista *Ciência Hoje*/SBPC)  
Ivanilda Gomes Ferreira  
Departamento de Informação  
e Documentação (MAST)

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150  
22290-180 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil  
Tel.: (0xx21) 2586-7249  
Fax: (0xx21) 2586-7400  
Homepage: <http://www.cbpf.br>



**O Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)** foi, juntamente com o Instituto de Física da Universidade de São Paulo, uma das alavancas para o desenvolvimento da física no Brasil. Sua fundação, em 1949, teve como pano de fundo a corrida nuclear pós-guerra, tendo sido motivada pela importância política que a pesquisa científica adquiriu naquele período e pelo entusiasmo com a descoberta do méson pi por Cesar Lattes.

Mas daí já se passaram 50 anos. O que é o CBPF hoje, entrando em um novo milênio? Esta publicação tem o objetivo de mostrar o que se faz hoje no CBPF, uma das fábricas de fazer ciência de nosso país. Nela, você vai descobrir uma instituição multifacetada e dinâmica com linhas de pesquisa ricas e interligadas. Não faltarão indicadores da produção científica, além de dados sobre o programa de pós-graduação, pioneiro na área de física e entre os melhores do Brasil. Recordamos também a criação do CBPF, através de emocionantes depoimentos de seus fundadores, Cesar Lattes, José Leite Lopes e Jayme Tiomno.

Como parte do recente processo de incorporação ao Ministério da Ciência e Tecnologia, o CBPF preparou detalhado relatório técnico. Tomando este por base, partimos agora para a divulgação de nosso trabalho para um público amplo, prestando, assim, contas à sociedade, que financia através dos impostos nossa instituição.

Integrando uma tradição científica ímpar ao dinamismo das novas gerações de pesquisadores, o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas enfrenta os grandes desafios da atualidade, contribuindo para o desenvolvimento científico e tecnológico de nosso país.



*João dos Anjos*  
DIRETOR

[ Í N D I C E ]

<b>Energias extremas do universo</b>	<b>6</b>	<b>Íons pesados relativísticos</b>	<b>48</b>
<b>Moléculas e superfícies</b>	<b>10</b>	<b>Os bárions charmosos</b>	<b>51</b>
<b>Brilho intenso no céu</b>	<b>13</b>	<b>A ciência e tecnologia das biocerâmicas</b>	<b>54</b>
<b>Precisão e sensibilidade</b>	<b>15</b>	<b>Uma nova entropia</b>	<b>57</b>
<b>Modelagem de Sistemas Naturais</b>	<b>18</b>	<b>Quatro andares de ciência e tecnologia</b>	<b>60</b>
<b>Fenômenos e materiais magnéticos</b>	<b>21</b>	<b>Uma nova cosmovisão</b>	<b>62</b>
<b>Mensageiros do espaço</b>	<b>24</b>	<b>A supercondutividade</b>	<b>66</b>
<b>A estrutura eletrônica da matéria</b>	<b>29</b>	<b>Física do charm</b>	<b>70</b>
<b>Efeito túnel e estabilidade nuclear</b>	<b>32</b>	<b>O impacto dos materiais avançados</b>	<b>73</b>
<b>Computação aliada à ciência</b>	<b>36</b>	<b>O vocabulário das partículas elementares</b>	<b>79</b>
<b>A microscopia do novo milênio</b>	<b>39</b>	<b>Laboratório de raios cósmicos</b>	<b>82</b>
<b>Caos e mecânica quântica</b>	<b>42</b>	<b>Técnicas para 'espionar' a matéria</b>	<b>85</b>
<b>Biominaerais magnéticos</b>	<b>45</b>	<b>Um pouco de história</b>	<b>88</b>

O CBPF foi fundado em 1949 por um grupo de eminentes físicos brasileiros. Teve, juntamente com o Instituto de Física da Universidade de São Paulo, um papel decisivo na formação das primeiras gerações de físicos brasileiros e latino-americanos e, nestas últimas cinco décadas, tem contribuído de maneira ímpar para o desenvolvimento da física no país. Nestas duas páginas, o leitor vai entender por que o CBPF é um dos mais importantes centros de pesquisa do Brasil e da América Latina – confira ainda nesta edição a história do CBPF, enriquecida com depoimentos exclusivos de quatro de seus fundadores, os físicos Cesar Lattes, José Leite Lopes, Jayme Tiomno e Elisa Frota-Pessôa.



## **CBPF, A MISSÃO.**

A missão institucional do CBPF é realizar pesquisas científicas em física e suas aplicações, bem como atuar como centro nacional de formação, treinamento e aperfeiçoamento de recursos humanos em ciência e tecnologia.

**COLABORAÇÕES INTERNACIONAIS.** O CBPF mantém intensa colaboração internacional com outros laboratórios e centros de pesquisa, em particular com o Laboratório do Acelerador Fermi (Fermilab), nos Estados Unidos, e a Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern), na Suíça, que abrigam os maiores aceleradores de partículas do mundo.

## **PIONEIRISMO NA PÓS-GRADUAÇÃO.**

Já na década de 1950, o CBPF promovia cursos avançados em física e matemática que, em 1963, se tornariam a primeira pós-graduação em física do país. Em 1972, depois de autorização governamental, passou a conceder diplomas de mestre e doutor em física.

## **UMA BIBLIOTECA DE US\$ 10 MILHÕES.**

A Biblioteca do CBPF, uma das mais importantes da área de física da América Latina, é referência para as congêneres no Brasil e no exterior. Seu acervo detém 21 mil livros, a assinatura de 249 periódicos e mais 600 títulos de revistas especializadas em suas estantes. Seu patrimônio é estimado em mais de US\$ 10 milhões, e seu acervo está disponível *on-line* – inclusive para a consulta de 168 periódicos, bem como de resumos de artigos. Através do Comut (serviço de Comunicação Bibliográfica), é possível atender a solicitações externas de cópias de artigos.

**OS QUADROS.** O CBPF tem atualmente 171 servidores, sendo 66 pesquisadores, 40 engenheiros e técnicos, bem como 65 gestores. Outras cerca de 240 pessoas integram seu quadro flutuante, formado por alunos de pós-graduação, de iniciação científica e tecnológica, bem como estudantes de 2º grau, além de professores visitantes e tecnologistas.

**DESPERTANDO VOCAÇÕES.** O CBPF tem em seu programa de Iniciação Científica 65 alunos. Outros 16 freqüentam o programa de Vocação Científica, voltado para estudantes de 2º grau, que são selecionados entre os melhores alunos das escolas públicas e privadas do Rio de Janeiro.

**EXCELÊNCIA É...** Em 2000, avaliação internacional, promovida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), atribuiu aos programas de mestrado e doutorado do CBPF 'nível de excelência internacional'. No ano anterior, esses programas obtiveram também da Capes conceito 6, sendo 7 o mais alto dado nesse tipo de avaliação. Twas... Já em 1994, o CBPF foi escolhido pela Academia de Ciências do Terceiro Mundo (Twas) como um dos 'Centros de Excelência do Hemisfério Sul' e, por conta desse título, recebeu nos últimos três anos pesquisadores visitantes de países como China, Índia, Cuba e Zâmbia. Fapesp... Recentemente, a área de Desenvolvimento de Materiais Cerâmicos do CBPF foi reconhecida pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) como integrante de seu Centro Multidisciplinar de Excelência. Pronex... Seis grupos de pesquisa do CBPF participam do Programa de Núcleos de Excelência, do Ministério da Ciência e Tecnologia. CTPetro... Projeto do CBPF, na área de catalisadores, sistemas orgânicos e polímeros, acaba de ser aprovado pelos disputados Fundos Setoriais do Petróleo (CTPetro), sob coordenação do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

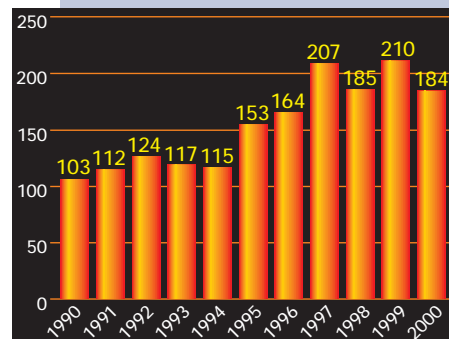
**CIENTISTAS DO NOSSO ESTADO.** Nos últimos dois anos, oito pesquisadores do CBPF receberam bolsas dos programas 'Cientistas do Nosso Estado' e 'Jovens Cientistas do Nosso Estado', ambas iniciativas da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj).

**PRIMEIRO LABORATÓRIO.** Graças aos pioneirismo do químico brasileiro Jacques Danon (1924-1989), foi criado no CBPF o primeiro laboratório da América Latina para trabalhar com efeito Mössbauer, que envolve a emissão e a absorção de radiação (do tipo gama) pelo núcleo dos átomos. Foi líder nas aplicações desse efeito a várias áreas da física e química.

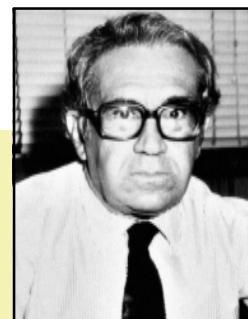
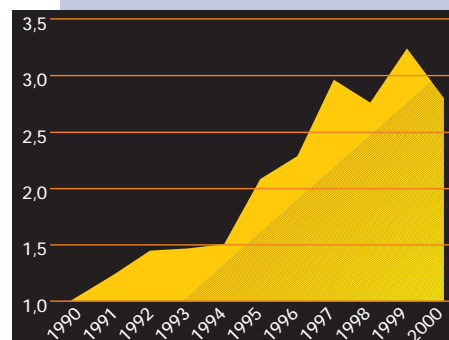
## A PRODUÇÃO CIENTÍFICA.

A produção científica do CBPF vem aumentando nos últimos anos, situando-se atualmente em níveis equivalentes àqueles de importantes centros internacionais de pesquisa em física. Nos gráficos abaixo, podem ser visto o número de artigos publicados por pesquisadores e alunos do CBPF em revistas internacionais arbitradas, bem como a média anual de artigos publicados por pesquisador.

NÚMERO DE ARTIGOS PUBLICADOS



MÉDIA ANUAL DE ARTIGOS PUBLICADOS



## OS MAIS CITADOS.

Dos pesquisadores do CBPF, 40% estão entre os 200 mais citados do Brasil na área da física, segundo pesquisa feita pelo jornal *Folha de S. Paulo* junto ao prestigioso *Citation Index*, publicado pelo Instituto de Informação Científica (ISI). Ano passado, três pesquisadores do CBPF receberam o prêmio *Citation Classics-ISI* pela publicação de dois artigos que ficaram entre os três produzidos no Brasil mais citados na área da física na década de 1990.

## O CENTRO INTERNACIONAL DA ASTROFÍSICA.

Por sua forte atuação na pesquisa em cosmologia e gravitação, o CBPF foi escolhido para ser a sede brasileira da prestigiosa rede internacional de Institutos de Astrofísica Relativística (ICRA), órgão com sede em Roma e filiado à Unesco.

**OS ASSESSORES.** Cerca de 70% dos pesquisadores do CBPF são assessores de órgãos de financiamento à ciência e tecnologia, como Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp).

**ALÉM DAS FRONTEIRAS DA FÍSICA.** Atualmente, 45% dos grupos do CBPF desenvolvem trabalhos que ultrapassam as fronteiras tradicionais da física, seja como pesquisa principal, seja como atividade paralela. Essa inter e multidisciplinaridade abrange, por exemplo, áreas como engenharia, ciências dos materiais, biologia, medicina, odontologia, farmácia, economia, geologia, arqueologia, catálise, meio ambiente, linguística, filosofia da ciência e teoria da comunicação.

**VERÃO, COSMOLOGIA E ALTAS ENERGIAS.** O CBPF organiza as Escolas de Cosmologia e Gravitação, que já estão em sua 10ª edição, bem como a Escola Internacional de Física de Altas Energias (Lishep), cuja 4ª escola foi realizada em 2001. Recentemente, criou sua Escola de Verão, voltada para alunos de pós-graduação e graduação, e com sessões destinadas à reciclagem de professores do nível médio, em uma iniciativa conjunta com a Secretaria de Educação do Estado do Rio de Janeiro. As duas primeiras versões da Escola de Verão atraíram cerca de 200 participantes de todo o Brasil e vários países latino-americanos. Nos últimos cinco anos, o CBPF foi a sede de cinco escolas nacionais, quatro escolas internacionais e quatro congressos internacionais.

**ORIGEM DOS PÓS-GRADUANDOS.** Um quarto dos alunos de mestrado e doutorado do CBPF vem de outros estados brasileiros, e outros 27% de outros países, especialmente da América do Sul. Com relação aos pós-doutorandos, a atuação internacional do CBPF fica ainda mais acentuada: cerca de 80% de outros países, com destaque mais uma vez para pesquisadores da América Latina.

**LABORATÓRIOS E SERVIÇOS.** A excelente infraestrutura laboratorial do CBPF permite a prestação de serviços a grupos de pesquisa do Rio de Janeiro e de outros estados. Um bom exemplo dessa atividade de apoio à comunidade científica é dado pelo Laboratório de Raios X, no qual 30% dos serviços de caracterização de materiais são feitos para grupos externos. Laboratórios da área da física da matéria condensada também recebem cerca de 15 solicitações anuais.

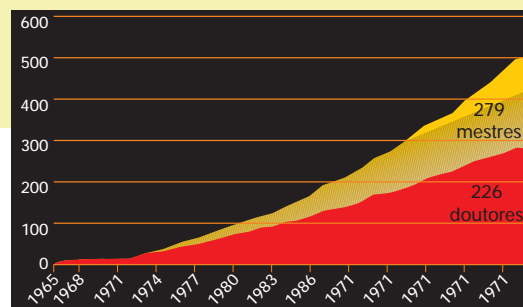
**OS CONSULTORES.** Pesquisadores do CBPF são consultores de 26 periódicos indexados, inclusive com participação no conselho editorial de periódicos de prestígio, como *Physical Review Letters*, *Chaos*, *Solitons and Fractals*, *Brazilian Journal of Physics*, *Hyperfine Interactions*, *Uroboros/International Journal of Philosophy of Biology*, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, *Nuovo Cimento D*, *Physica A* – esta última tem como editor um pesquisador do CBPF –, *Journal of Statistical Physics*, entre outras publicações.

**MESTRADO EM INSTRUMENTAÇÃO.** O CBPF implantou em 2000, com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), o primeiro mestrado profissionalizante do Brasil em instrumentação científica. Os temas de teses estão ligados a projetos de pesquisa dos laboratórios.



**MESTRES E DOUTORES.** O programa de pós-graduação do CBPF conta hoje com 88 estudantes, sendo 14 de mestrado e 74 de doutorado. Desde sua criação, foram mais de 500 teses defendidas (ver gráfico ao lado).

EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE TESES



**A REDE RIO E A INTERNET II.** O CBPF participou da implantação da rede de alta velocidade Internet II no estado do Rio de Janeiro. Abriga também a Coordenação de Engenharia Operacional (CEO) da Rede Rio de Computadores, sendo essa rede financiada pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj). O CBPF é um dos cinco pontos de presença do atual *backbone* da rede.

**PRÊMIOS E BOLSAS DE PRODUTIVIDADE.** Vários pesquisadores do CBPF foram agraciados com prêmios nacionais e internacionais. Atualmente, a maioria de seus pesquisadores tem Bolsas de Produtividade em Pesquisa concedidas pelo CNPq.

**A TESE DO ANO.** O prêmio da Sociedade Brasileira de Física para a melhor tese de doutorado em física foi concedido em 1999 a um estudante do CBPF, por seu trabalho na área de física estatística.

**FORMAÇÃO DE GRUPOS DE PESQUISA.** Nos últimos dez anos, o CBPF contribuiu para formar 23 grupos de pesquisa, no Brasil e no exterior. Foram sete grupos em universidades federais e estaduais do estado do Rio de Janeiro, além de 14 grupos em outros estados (Rio Grande do Norte, Pernambuco, Minas Gerais, Alagoas, Paraná, Paraíba, Rio Grande do Sul, Ceará e Espírito Santo) e mais dois na América Latina (Peru e Argentina).

**CARÁTER REGIONAL...** O CBPF já formou mestres e doutores de todas as universidades fluminenses, com ênfase naqueles originários da Universidade Federal do Rio de Janeiro (55% deles). **Nacional...** Nos últimos 15 anos, um terço dos alunos formados pelo CBPF era de 16 estados brasileiros. **Latino-americano...** Nesse mesmo período, formou alunos de 14 países, com ênfase nos da América Latina – vale ressaltar que o CBPF é a sede do Centro Latino-americano de Física (CLAF), sendo que estes dois centros mantêm com o CNPq convênio para a concessão de bolsas de doutorado e pós-doutorado a estudantes latino-americanos. **Internacional...** Por ano, o CBPF recebe, em média, 15 pós-doutorandos e outros 35 pesquisadores visitantes, em sua grande maioria provenientes de países estrangeiros.

**DETECTORES.** Detectores de raios X, bem como a eletrônica e o software associado a eles, foram desenvolvidos e construídos no CBPF e vendidos a universidades brasileiras e estrangeiras de prestígio, como Weizman Institute (Israel) e Queens University (Canadá). Detectores de partículas foram também desenvolvidos para grandes colaborações internacionais na área de física de altas energias, como o experimento Dzero, voltado para analisar o choque de prótons com sua antipartículas, e o Observatório Pierre Auger, que investiga os chamados zévatrons (raios cósmicos ultra-energéticos).

**PUBLICAÇÕES.** O CBPF divulga suas atividades de pesquisa através de três publicações: *Notas de Física*, *Notas Técnicas e Ciência e Sociedade* – esta última voltada para a história e filosofia da ciência, bem como a política científica. Além disso, a série *Monografias de Física* é destinada à publicação de notas de cursos. Promove também a divulgação científica através da produção de vídeos, bem como a organização de cursos, encontros, seminários e exposições.

**O APOIO.** Para garantir a qualidade da produção científica, há no CBPF, além de um departamento de administração, três coordenações de apoio à pesquisa: de atividades técnicas, que faz o apoio à infra-estrutura experimental e informática; de formação científica, que coordena os cursos de mestrado e doutorado; e a de documentação e informação científica, responsável pela Biblioteca e pela divulgação da produção científica e editorial da instituição.

# Energias extremas no universo

A existência de raios cósmicos de altas energias é um dos problemas mais intrigantes na astrofísica e na física das partículas atuais. Há décadas que a solução dos paradoxos apresentados por essas partículas com energias macroscópicas desafia a criatividade e engenhosidade dos físicos.



Um dos primeiros tanques instalados pelo Observatório Auger para a realização de testes. Ao fundo, vêem-se as cordilheiras dos Andes. A cor dos tanques foi escolhida para não agredir o ecossistema local.

CECIDO PELO AUTOR

**Raios cósmicos** altamente energéticos não deveriam existir. Mas o fato é que existem. Além disso, suas fontes deveriam ser facilmente identificáveis, pois, com tamanha energia que carregam, essas partículas praticamente viajam em linha reta de sua origem até nós, insensíveis à ação de qualquer campo magnético ao longo do percurso, mesmo que essas distâncias tenham sido cosmológicas.

Porém, nunca se determinou nenhuma relação entre galáxias próximas e raios cósmicos com energias acima de  $10^{20}$  elétrons-volt (unidade de energia usada em física de partículas). Para se ter uma idéia, essa quantidade de energia é a mesma carregada por uma bola de tênis sacada pelo nosso campeão Guga. Vale lembrar, porém, que os raios cósmicos – nome que permaneceu por razões históricas – são partículas subatômicas, cujas dimensões são desprezíveis em comparação com qualquer objeto macroscópico (ver também nesta edição 'Laboratório de raios cósmicos').

Também não se conhece nenhum mecanismo físico que possa explicar como acelerar partículas a essas energias. Os mais potentes aceleradores construídos até hoje geram partículas cem milhões de vezes menos energéticas.

**UM A CADA SÉCULO.** A energia dos raios cósmicos pode variar muito. Quanto maior a energia, mais raros são. Seu fluxo, isto é, a quantidade deles que cai em uma área decresce por um fator mil para cada aumento de dez no fator energia. Por exemplo, um sensor de  $1\text{m}^2$  ao nível do mar mede, a cada segundo, mais de 100 raios cósmicos – grande parte dos raios cósmicos que atingem a Terra tem sua origem na galáxia em que vivemos, fruto de eventos cataclísmicos como a explosão de supernovas (ver nesta edição 'Brilho intenso no céu').

Já o fluxo dos raios cósmicos com a energia mais alta já observada é de um deles por quilômetro quadrado a cada século! Logicamente, os cientistas têm pressa em encontrar respostas para suas indagações e, claro, não se conformariam em esperar séculos para colher alguns poucos raios de extrema energia. Uma solução para o problema está em montar uma grande área de sensores para capturá-los – tema que iremos tratar mais adiante neste artigo.

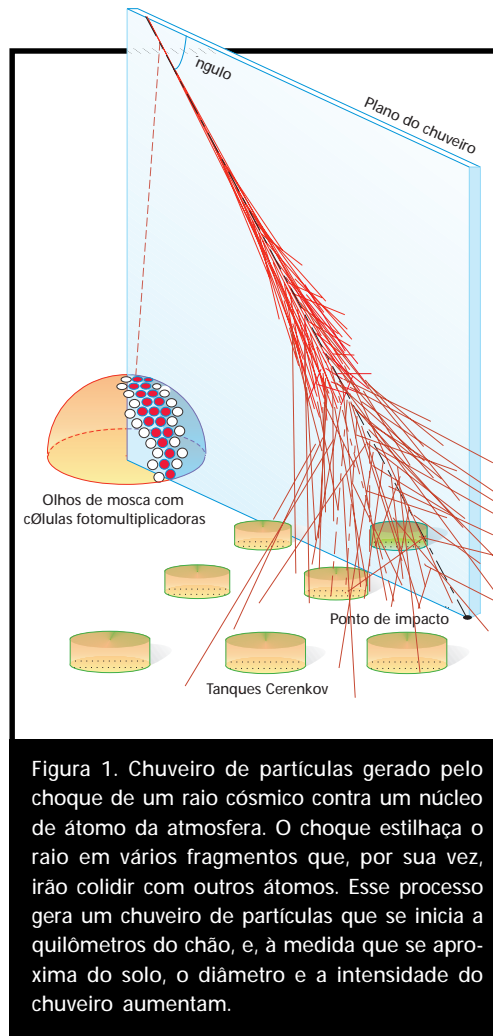


Figura 1. Chuveiro de partículas gerado pelo choque de um raio cósmico contra um núcleo de átomo da atmosfera. O choque estilhaça o raio em vários fragmentos que, por sua vez, irão colidir com outros átomos. Esse processo gera um chuveiro de partículas que se inicia a quilômetros do chão, e, à medida que se aproxima do solo, o diâmetro e a intensidade do chuveiro aumentam.

**PANQUECA DE PARTÍCULAS.** O recorde de energia de um raio cósmico medido na Terra é de 320 bilhões de bilhões de elétrons-volt, isto é, o número 320 seguido de 18 zeros. Para representar essa quantidade de energia, usa-se o tão incomum prefixo zeta (Z), que significa o número 1 seguido de 21 zeros. O recorde fica, então, em 0,32 ZeV, ou 50 joules, a energia de uma bola no saque de Guga, concentrada numa partícula microscópica.

Ao entrar na atmosfera terrestre, o raio cósmico colide com o núcleo de uma das moléculas do ar a dezenas de quilômetros de altura acima do solo, quebrando-o em inúmeros fragmentos (figura 1). Esses estilhaços, por sua vez, carregam também muita energia e colidem com outros átomos, em um processo no qual o número de partículas cresce rapidamente, abrindo-se em uma 'panqueca' de partículas que viajam praticamente à velocidade da luz.

Na verdade, a panqueca parece mais com a capa de um guarda-chuva invertido, figura denominada, no jargão dos especialistas, 'chuveiro aéreo extenso'. No ponto onde o número de partículas atinge um máximo – a densidade de partículas está concentrada no centro do chuveiro e cai de forma gradativa em direção à periferia –, a quantidade delas pode chegar a centenas de bilhões. Depois desse máximo, que é muito característico e está associado à energia e à natureza original do raio cósmico, o chuveiro começa a se dissipar, mas continua expandindo suas dimensões.

**LÂMPADA NA ATMOSFERA.** Em sua cascata aérea, os chuveiros extensos arrancam elétrons dos átomos da atmosfera – no jargão técnico, diz-se que esse átomos são ionizados –, fenômeno que ocorre principalmente com os átomos de nitrogênio. O resultado dessa ionização é a emissão de luz ultravioleta, que, na área central do chuveiro, é suficientemente intensa para ser observada a grandes distâncias.

A intensidade dessa luz, porém, é equivalente à de uma lâmpada com poucos watts de potência atravessando a atmosfera à velocidade da luz, aumentando e depois diminuindo seu brilho. Esse efeito da fluorescência dos átomos de >>>

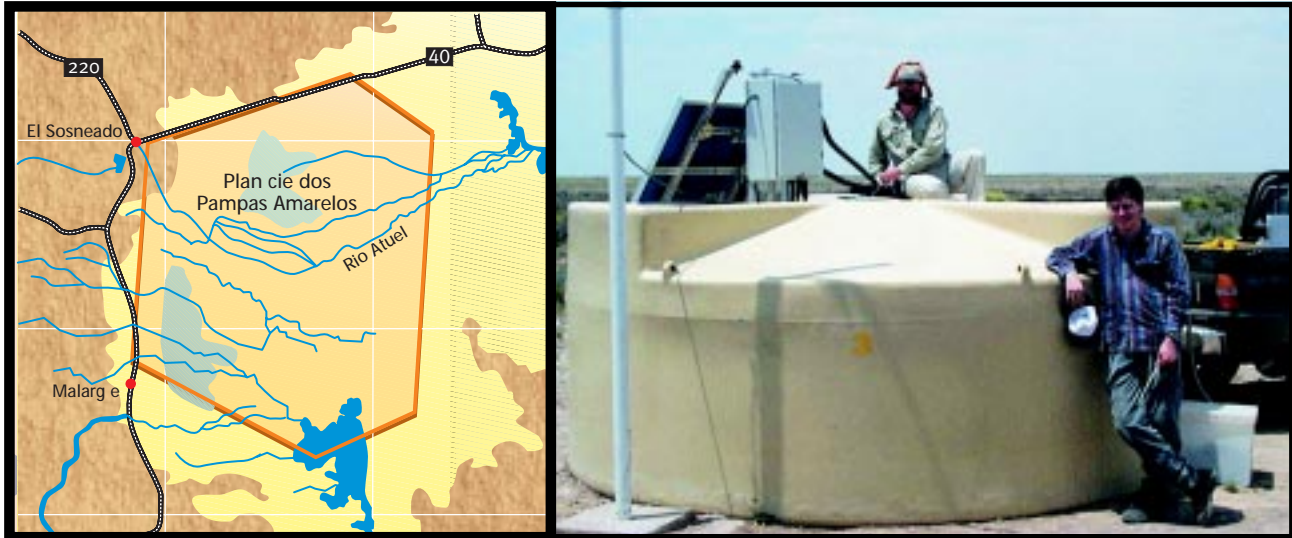


Figura 2. Pesquisadores trabalhando na montagem de um dos tanques Cerenkov feitos no Brasil. No detalhe, o hexágono mostra a área ocupada pelo Observatório Auger, na província de Mendoza (Argentina)

nitrogênio não pode ser visto a olho nu, mas apenas por telescópios especiais.

Ao chegar à Terra, o chuveiro pode cobrir uma área com diâmetro de alguns quilômetros, sendo que, nessa fase, é formado por elétrons e sua antipartícula (pósitrons), raios gama (ondas eletromagnéticas muito energéticas), múons ('parentes' do elétron), além de poucos prótons e nêutrons.

**CONSÓRCIO INTERNACIONAL.** O desafio oferecido para a compreensão da origem e a natureza de raios cósmicos com energias extremas motivou um grupo de cientistas a formar um consórcio internacional e a construir um laboratório para observá-los. Em outubro deste ano, completa-se a primeira etapa da construção do Observatório Pierre Auger, na província de Mendoza (Argentina). Dentro

## TANQUES OPERAM COM TELEFONIA CELULAR

Visto de cima, o conjunto de tanques do Observatório Auger formará uma gigantesca grade triangular, com separação de 1,5 km entre os tanques (figura 2). Cada tanque é um cilindro com área de 10 m<sup>2</sup> e uma parede lateral da altura de 1,5 m. São hermeticamente fechados e cheios de água filtrada por um processo sofisticado para evitar o crescimento de microrganismos.

Suas paredes interiores serão revestidas por plástico branco que ajuda a difundir a luz, gerada pela passagem de partículas carregadas, o chamado 'efeito Cerenkov' – o efeito ocorre quando uma partícula viaja com velocidade superior à da luz no meio

em questão. A intensidade luminosa, registrada pelas células fotomultiplicadoras no interior dos tanques, é proporcional à energia das partículas que a geraram.

Quando chega ao chão, um chuveiro cósmico ativa vários tanques. A intensidade de energia do chuveiro e a medida precisa do instante de chegada das partículas que atingem cada tanque permitem determinar a posição do núcleo, bem como definir a direção de onde veio o chuveiro.

Cada tanque tem um receptor GPS (*Global Positioning System*), sistema de posicionamento baseado em satélites, que faz a vez de um relógio muito preciso. O sistema GPS tem precisão na casa

dos bilionésimos de segundo, escala de tempo necessária para a execução de uma instrução em um microcomputador de última geração.

Os tanques têm um sistema de comunicações semelhante ao dos telefones celulares, operando na frequência de 915 MHz, que funciona como gatilho para o registro da chegada de um chuveiro grande.

O sistema eletrônico de um tanque é alimentado por um conjunto de baterias e painéis solares. Como os tanques estarão espalhados numa região semidesértica, a alimentação por energia elétrica convencional torna-se praticamente inviável.

de dois anos, começará a construção de outro complexo de detectores no estado de Utah (Estados Unidos) para cobrir o céu do hemisfério Norte.

O Observatório Auger – o nome é uma homenagem ao físico francês Pierre Victor Auger, um dos pioneiros no estudo de raios cósmicos – utilizará duas técnicas complementares para apurar tanto a energia quanto a origem e a composição dos raios cósmicos. A primeira delas está baseada na construção de tanques de água (figura 2) espalhados por uma área equivalente a quase três vezes à do município do Rio de Janeiro (ver 'Tanques operam com telefonia celular').

A segunda são telescópios especiais, cuja função é captar a fluorescência causada pela passagem dos raios cósmicos pela atmosfera (figura 3). A área coberta pelos tanques terá três deles, e um quarto telescópio ocupa o centro da rede de tanques.

Cada telescópio funciona como um olho de mosca, formando um conjunto de milhares de pequenos olhos que focalizam, cada um, um pequeno cone no céu. Esses diminutos olhos são fotomultiplicadoras, sensores de luz extremamente precisos, rápidos e capazes de acompanhar, por exemplo, o movimento do núcleo de um chuveiro cósmico através da atmosfera.

**OLHOS EM NOITES LÍMPIDAS.** Ao todo, haverá 13,2 mil olhos supervisionando os 3 mil km<sup>2</sup> do Observatório Auger. Devido a essa sensibilidade, os telescópios só poderão ser usados em noites límpidas, sem a luz da Lua. Enquanto os tanques

## PROJETO REÚNE CERCA DE 20 PAÍSES

O CBPF colabora com a Universidade Estadual de Campinas no projeto do Observatório Auger. Dele participam também instituições de mais 18 países. Nossa equipe é responsável pela supervisão e instalação dos tanques na fase inicial do observatório, bem como pela supervisão da organização do *software* para o processamento e análise dos dados do experimento, além de ter contribuído com a preparação do *software* de aquisição e análise dos dados.

O CBPF tem servido de apoio aos cientistas de outras instituições, como Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal da Bahia, PUC do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Espírito Santo e Universidade Federal de Juiz de Fora, que também participam do projeto.

coletam dados 24 horas por dia, o detector de fluorescência atua em apenas 10% do tempo.

Porém, a informação coletada por esses telescópios acompanha todo o desenvolvimento do chuveiro ao longo de sua trajetória descendente, em contraste com os tanques que tiram um tipo de 'fotografia instantânea' do chuveiro no momento que atinge o chão.

Assim que entrar em operação, o Observatório Auger se transformará na mais poderosa janela de observação de raios cósmicos (ver 'Projeto reúne cerca de 20 países'). Será um passo importante para desvendar um dos mais instigantes mistérios da física moderna: os mecanismos capazes de imprimir tamanha energia a partículas e como elas se propagam no espaço. ■



Figura 3. Instalações do telescópio 'olho de mosca', que vai captar a fluorescência causada pela passagem dos raios cósmicos pela atmosfera. Três deles ficam em volta da área coberta pelos tanques, e um quarto telescópio ocupa o centro da rede de tanques.



Ronald Cintra Shellard

# Moléculas e superfícies



Do meio ambiente à neurobiologia, passando pela corrosão de metais, a física de moléculas e superfícies vai cada vez mais fundo para revelar numerosos fenômenos de natureza básica e de aplicação tecnológica.

**Água, gases** e outros complexos podem produzir importantes reações químicas nas superfícies, por exemplo, de óxidos, metais e ligas. O modo como essas substâncias interagem, bem como as conseqüentes alterações superficiais, têm interesse para diversas áreas interdisciplinares.

Assim, a meta do cientista que se dedica ao estudo interdisciplinar da física, química, biologia e engenharia de moléculas e superfícies é desenvolver uma compreensão capaz de prever e entender várias propriedades dessa interação, para obter controle sobre numerosos fenômenos de importância tecnológica, como monitoramento e controle de poluição ambiental; corrosão de superfícies metálicas; estabilidade das interfaces em materiais usados para armazenar combustíveis; destruição pela ação da luz de materiais que causam poluição de águas; eliminação de perigosos poluentes atmosféricos, industriais e orgânicos.

A partir da década de 1990, com o avanço das técnicas computacionais, os modelos teóricos começaram a ser usados para melhorar nossa compreensão das superfícies e de fenômenos que envolvem seu estudo. A comunicação de dados através de redes de computadores também permitiu a modernização do funcionamento de vários grupos de pesquisa no mundo. Para desenvolver pesqui-

sas em níveis internacionais, o Grupo de Moléculas e Superfícies do CBPF utiliza computadores potentes e rápidos – as chamadas estações de trabalho – e programas de ponta.

Neste artigo, o leitor vai conhecer algumas das áreas em que o nosso grupo tem desenvolvido suas pesquisas e dado contribuições (ver 'Grupo faz parte de programa de excelência'). Começaremos pelos inumeráveis compostos formados pelo elemento químico carbono, passando por plásticos que conduzem eletricidade e moléculas que carregam informação no cérebro, para chegar a um dos produtos mais importantes para a indústria química de hoje, os catalisadores.

**ÁLCOOL E BOLAS DE CARBONO.** A química orgânica destaca-se pelo número e pela complexidade das substâncias que o elemento carbono pode formar. Conhecem-se hoje cerca de 7 milhões desses compostos, contra aproximadamente 100 mil de todos os outros elementos. Assim, esse ramo da química

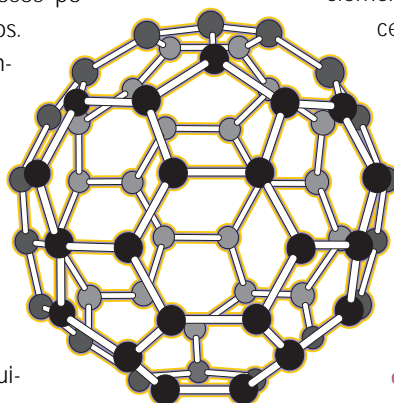


Figura 1. Esquema da buckybola mais comum, com 60 átomos de carbono, descoberta em 1985. Desde então, outras formas foram descobertas, e várias aplicações têm surgido para essa terceira forma do carbono na natureza – as outras duas formas são o grafite e o diamante.

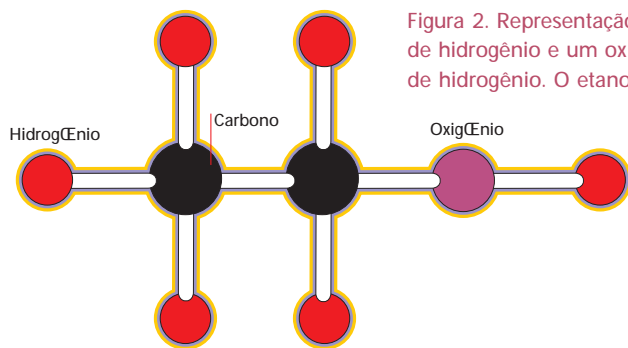


Figura 2. Representação da molécula de etanol, com um grupo hidroxila (um átomo de hidrogênio e um oxigênio) ligados a uma curta cadeia de dois átomos de carbono e cinco de hidrogênio. O etanol é o álcool presente em bebidas como vinho, cerveja e aguardentes.

ca é visto hoje mais como a química dos compostos de carbono, excluindo-se só compostos mais simples, como o gás dióxido de carbono e os carbonatos (mármore, calcário etc.).

Na natureza, o elemento carbono existe como grafite e diamante. Mas em 1985 cientistas descobriram uma terceira forma de carbono. Nela, os átomos se ligam em anéis, que formam várias moléculas curvas. O tipo mais comum dessas moléculas, com 60 átomos de carbono, foi apelidada buckybola, para a qual estão sendo descobertas várias aplicações (figura 1).

Entre os compostos orgânicos, talvez o álcool seja um dos mais populares e também um daqueles com maior número de aplicações industriais. Suas moléculas se caracterizam por ter pelo menos um grupo de hidroxila (um átomo de oxigênio ligado a outro de hidrogênio) diretamente unido a uma cadeia ou a um anel de átomos de carbono.

Usualmente, pensamos no álcool apenas como um ingrediente do vinho, da cerveja e das aguardentes. No entanto, o chamado etanol é apenas um dos tipos de alcoóis. Nele, o grupo hidroxila é unido a uma curta cadeia de dois átomos de carbono e cinco de hidrogênio (figura 2). Outros tipos de alcoóis são usados para produzir solventes, detergentes, perfumes, vernizes e anticongelantes.

**PLÁSTICOS E NEURÔNIOS.** Na química, usa-se a denominação polímero para indicar uma molécula orgânica gigante, formada pela união de várias moléculas menores e idênticas chamadas monômeros. A seda, a lã de carneiro e nossos cabelos são exemplos de polímeros.

Sempre aprendemos que os plásticos, o tipo de polímero artificial mais importante, não conduzem eletricidade (figura 3). Mas, sob certas circunstâncias – quando dopados com outras substâncias –, esses materiais podem se comportar como um metal. Essa descoberta foi tão importante que deu a três cientistas o prêmio Nobel de química em 2000.

Costumamos falar sobre a ‘revolução’ da Internet devido a centenas de milhões de usuários que se comunicam entre si ocasionalmente. Porém, isso não é nada comparado aos

## GRUPO FAZ PARTE DE PROGRAMA DE EXCELÊNCIA

Nesta últimas duas décadas, o Grupo Moléculas e Superfícies vem trabalhando intensamente para manter sua alta produtividade científica, considerada de nível internacional. Além de numerosos artigos publicados em revistas internacionais de prestígio, o grupo tem recebido com frequência convites para trabalhos de revisão, comunicações, palestras e participações em importantes congressos multidisciplinares nacionais e internacionais.

Na década de 1990, coordenamos o convênio de cooperação internacional Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)/CBPF – *National Science Foundation* (Estados Unidos) e acabamos de publicar um capítulo em

um livro sobre a interação de moléculas com superfícies.

Fazemos parte do grupo de excelência Pronex 97 (núcleos de materiais cerâmicos para aplicações em eletrônica) e somos colaboradores externos do grupo de excelência Pronex 96 (modelagem e simulação molecular de propriedades físico-químicas). Além disso, somos membros colaboradores do Centro Multidisciplinar para o Desenvolvimento de Materiais Cerâmicos, um dos dez centros de excelência da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

Temos orientado e co-orientado trabalhos de iniciação científica, mestrado, doutorado, assim como trabalhos de pesquisa de recém-doutores bolsistas do CNPq e da Fundação Carlos Chagas Fi-

lho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj) que participam na elaboração de livros e trabalhos de revisão internacional.

Temos publicações recentes com pesquisadores da área de física, química, biologia e engenharia de vários institutos e estados brasileiros, incluindo centros de excelência e centros emergentes (UFSC, UFRJ, IME, UFMG, UFPE, UFF, UNB, UFBA, UFRGS, UEPG, Unicamp, UEG, UENF, USP, UFES, UEP, Tecnorite), além de publicações com pesquisadores de instituições internacionais.

Nossa captação de recursos vem da Faperj, do CNPq e do Pronex, bem como da Coordenação de Apoio a Pessoal de Ensino Superior (Capes) e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep).

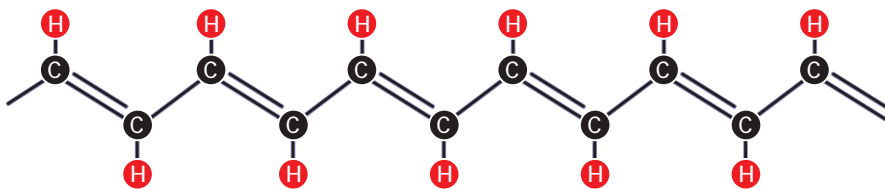


Figura 3. O plástico é o polímero artificial de maior aplicação. Sua molécula gigante é formada pela repetição de unidades menores, os monômeros. Em geral, plásticos são maus condutores de eletricidade, mas, quando dopados com outras substâncias, podem se assemelhar a metais na condução.

100 bilhões de neurônios (células nervosas) que carregamos e que se comunicam entre si continuamente na estrutura mais complexa que conhecemos: o cérebro

Mais especificamente, essa comunicação, cuja natureza é química, ocorre através de moléculas complexas chamadas neurotransmissores, que também são alvo de estudo multidisciplinar da área de moléculas e superfícies. Mais uma vez, a descoberta de mecanismos que envolvem a comunicação nervosa rendeu o Nobel de fisiologia e medicina.

**CERÂMICAS E ÁGUA NO ESPAÇO.** Resistente e impermeável, a cerâmica tem vasta utilização, tanto doméstica quanto industrial. Para obtê-la, é necessário cozinhar a argila (um tipo de barro retirado de depósitos no solo), cuja consistência pastosa permite que seja manipulada à vontade. Depois de molda-

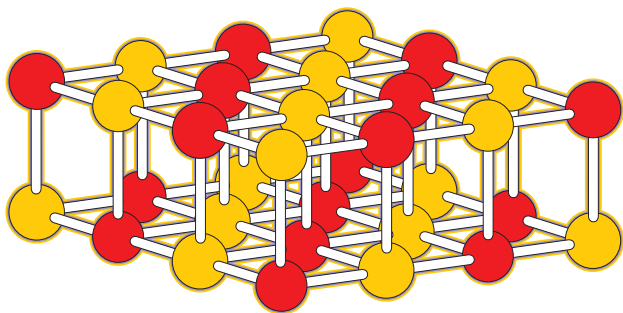


Figura 4. Disposição dos átomos de Mg (magnésio) e O (oxigênio) na superfície de um catalisador de óxido de magnésio (MgO). As esferas amarelas representam o Mg, e as vermelhas representam oxigênio.

da, a peça é colocada num forno para cozinhar, o que solidifica o material e fixa sua forma.

O primeiro cozimento produz uma cerâmica ainda porosa. Para torná-la impermeável, é necessário vitrificar ou esmaltar sua superfície, mergulhando a peça em uma solução de certos óxidos

metálicos em água – e é para a pesquisa destas últimas substâncias que o estudo multidisciplinar de moléculas e superfícies dá sua contribuição. Depois de secar, ela é submetida a um segundo cozimento, que derrete o revestimento e o faz aderir à cerâmica (ver também nesta edição 'A ciência e tecnologia das biocerâmicas').

Porém, entre os fenômenos a que se dedica o estudo de sistemas que envolvem moléculas e superfícies, a catálise talvez seja o de maior importância para a indústria, principalmente para a produção de compostos químicos e de petróleo.

Os catalisadores são substâncias que podem alterar a velocidade de uma reação química e continuar imutáveis. Até astronautas dependem de catalisadores, como a platina, para produzir água no espaço. A maioria dos carros modernos utiliza um conversor catalítico, que transforma gases tóxicos naqueles menos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde (figura 4).

Os benefícios das reações catalíticas são bem representados pelos dados de que aproximadamente 90% de todos os produtos químicos sintéticos dependem de catalisadores, que possibilitam a produção em grande escala de produtos para uso diário, como gasolina e outras fontes de energia, fertilizantes, plásticos, detergentes, remédios e alguns alimentos.

De bolas de carbono a moléculas cerebrais, o estudo multidisciplinar de sistemas envolvendo moléculas e superfícies se destaca pela vasta amplitude de campos em que vem atuando. Por sua ampla aplicação industrial, bem como por sua capacidade de desvendar fenômenos de natureza básica, ela já nasceu com a principal característica que deve marcar a física, química e biologia deste novo século: a multidisciplinaridade. ■

## COORDENADOR É ÚNICO COMPONENTE FIXO

O Grupo de Moléculas e Superfícies utiliza o modelo de funcionamento de universidades e centros de excelência internacionais. Em nosso caso, o coordenador do grupo (Carlton A. Taft)

é o único componente fixo e membro do CBPF.

Colaboradores, pós-doutorandos e alunos de pós-graduação têm uma presença física variável na instituição. Conta-

tos diários, no entanto, são mantidos através da Internet, e o acesso à pesquisa se dá através de poderosas estações de trabalho. Essa rotina é complementada por visitas periódicas ao CBPF.

# Brilho intenso no céu

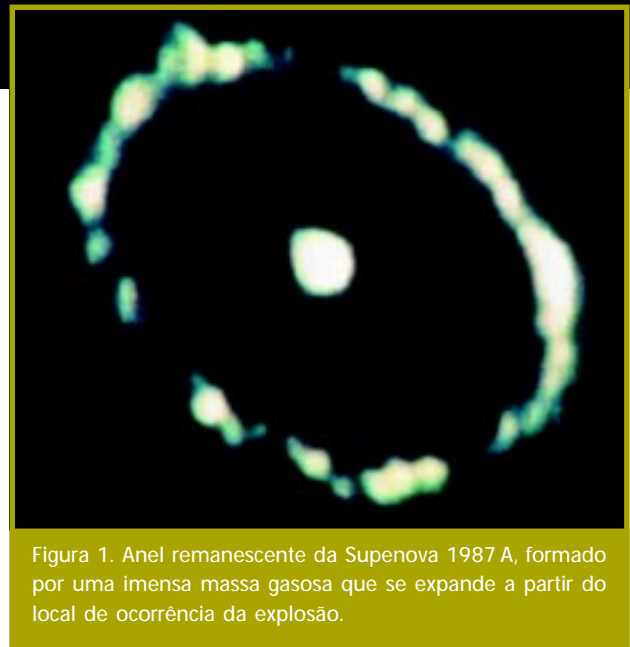
**A aproximadamente cada meio século, um dos fenômenos astrofísicos mais espetaculares ocorre em alguma galáxia do universo. Denominado supernova, essa megaexplosão de uma estrela massiva gera luminosidade por vezes superior à da galáxia que abriga evento.**

**Recentemente,** fomos contemplados com a ocorrência de uma supernova em uma galáxia próxima à nossa, a Supernova 1987. Afortunadamente, a estrela que originou o evento estava sendo monitorada por telescópios e por nossos observatórios mais bem aparelhados. A explosão, que apresentou uma curva de luminosidade que decaiu em aproximadamente dois meses, aconteceu na Nuvem de Magalhães, a cerca de 170 mil anos-luz da Terra – um ano-luz equivale a cerca de 9,5 trilhões de quilômetros, ou seja, é a distância percorrida em um ano pela luz, cuja velocidade no vácuo é de aproximadamente 300 mil km por segundo. Ainda hoje observamos um anel de massa gasosa de dez anos-luz de diâmetro, em expansão, com centro localizado no local da explosão – a figura 1 mostra a atual configuração da Supernova 1987A.

A primeira supernova a ter sua explosão registrada ocorreu ainda em 1054. A nebulosa de Caranguejo, na constelação de Touro, é o que sobrou dessa explosão, que foi registrada na época por astrônomos chineses.

**BRILHO DE UMA GALÁXIA.** Uma explosão de supernova é um evento astrofísico dos mais espetaculares quando se trata da emissão de luz e energia. Para se ter uma idéia, no momento da explosão o brilho de uma supernova é comparável àquele que tinha antes toda a galáxia onde ocorreu o evento.

A imagem da figura 2 mostra o resultado de uma simulação da supernova da galáxia Centaurus A, a 13 milhões de anos-luz, detectada em maio de 1986. Os gráficos dentro da figura, com uma largura de aproximada-



HUBBLE SPACE TELESCOPE

Figura 1. Anel remanescente da Supernova 1987 A, formado por uma imensa massa gasosa que se expande a partir do local de ocorrência da explosão.

mente três meses, mostram a evolução no tempo de seu brilho e a variação da cor da luz que ela emite durante a explosão, seu espectro.

**UNIVERSO ACELERADO.** A partir da observação de supernovas e dos objetos remanescentes dessa explosões, físicos e astrônomos procuram extrair informações sobre os constituintes mais fundamentais da matéria e a evolução da própria matéria em escala astrofísica e cosmológica, ou seja, como nosso universo evoluiu (ver 'Trabalho envolve fronteira de quatro áreas').

Foi, por exemplo, das observações de supernovas em galáxias distantes que se chegou, há cerca de dois anos, à inesperada conclusão de que hoje nosso universo expan-

&gt;&gt;&gt;

de-se de modo acelerado. O método empregado pelos pesquisadores foi o de comparar as distâncias entre as explosões com o deslocamento das galáxias em que ocorreram.

Desde a década de 1920, através dos trabalhos do astrônomo americano Edwin Hubble (1889-1953), sabe-se que as galáxias se afastam uma das outras. Porém, o fato de elas se afastarem aceleradamente foi considerado um dos avanços mais importantes da ciência do século 20, além de ser uma questão cosmológica das mais relevantes, pois está relacionada com a própria formulação dos princípios da teoria da relatividade geral, publicada pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955), em 1916.

**ESTADO HIPERQUENTE.** Da estrutura dos objetos extremamente densos e compactos remanescentes da explosão de supernovas tipo II (as que deixam uma estrela de nêutron remanescente), podem-se extrair conclusões sobre a teoria para os fenômenos no universo liliputiano das partículas subatômicas. Por exemplo, é possível que através da observação das estrelas de nêutrons sejam encontradas evidências

sobre o plasma de quarks, um tipo de estado hiperquente da matéria formado por essas partículas fundamentais.

O plasma de quarks seria a tão esperada consolidação da cromodinâmica quântica, teoria que lida com as chamadas forças (ou interações) fortes entre partículas e que vem se consagrando apenas por evidências indiretas ou pela sua própria consistência matemática interna.

Talvez, seja através do estudo de supernovas e de seus objetos remanescentes que essa teoria obtenha finalmente seu 'certificado final de validade'. ■

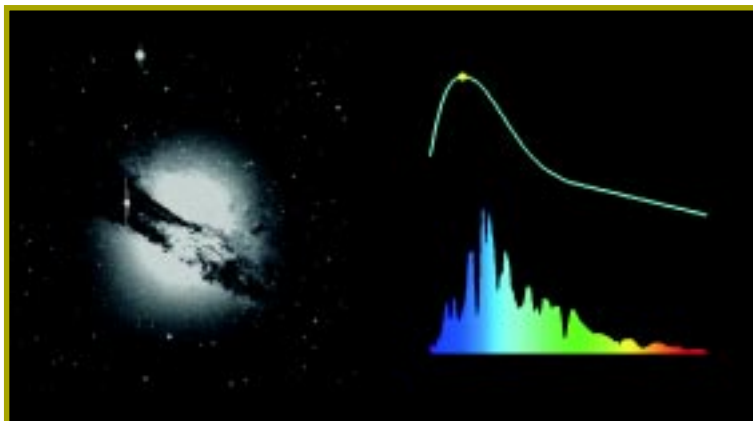


Figura 2. Simulação da explosão da supernova da galáxia Centaurus A. As curvas indicam a variação no tempo do brilho e da cor da luz emitida.

## TRABALHO ENVOLVE FRONTEIRA DE QUATRO ÁREAS

No CBPF, alguns pesquisadores dedicam-se à explicação das explosões de supernovas e à análise dos diferentes aspectos físicos que se entrelaçam no esclarecimento desse fenômeno. Nos últimos dez anos, o Grupo de Física Nuclear e Astrofísica tem se inserido no cenário da pes-

quisa internacional da física de supernovas e da formulação da estrutura de estrelas de nêutrons remanescentes da explosão.

Alguns temas de pesquisas são a descrição da hidrodinâmica explosiva; a mudança das características da matéria estelar submetida a pressões altíssimas e a conseqüente formação de elementos pesados; a nucleossíntese explosiva.

Trabalhando na fronteira da física de partículas elementares, da física nuclear de altas energias, da astrofísica e da cosmologia, desenvolvemos propostas para diferentes transições de fase da matéria estelar ocorridas em supernovas,

em estrelas de nêutrons em formação e na estrutura final desses objetos compactos.

Além de estudantes de mestrado, doutorado e pós-doutorado, jovens em programas de iniciação científica são envolvidos em nossas pesquisas. Também colaboram com nosso grupo pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, do Centro Federal de Ensino Técnico (RJ), da Universidade Federal de Roraima e Universidade Federal da Paraíba. Pelo menos seis teses – duas de mestrados e quatro de doutorado – foram defendidas nessa área sob a orientação de pesquisadores do grupo.



Sentados (esq. para dir.): Emil de Lima Medeiros e Sergio B. Duarte; em pé (esq. para dir.): Alejandro Dimarco e Edgar de Oliveira.

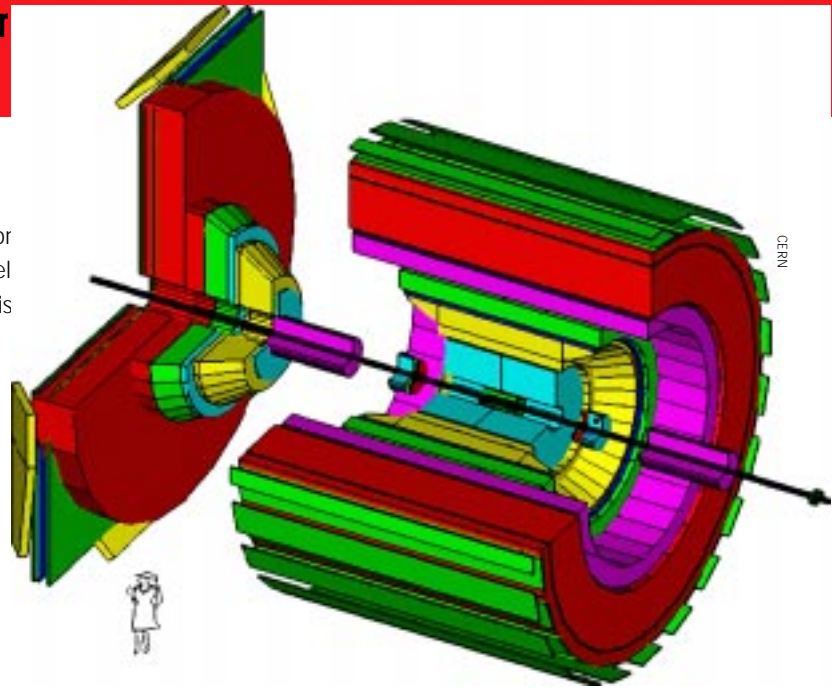
# Precisão e sensibilidade

**Depois de 11,5 anos, o detector Delphi encerrou sua carreira com uma ficha de bons serviços prestados à física: fotografou dezenas de milhões de colisões da matéria contra a antimatéria, dados que levaram à descoberta de novas partículas e à confirmação de importantes previsões teóricas.**

**Em dezembro de 2000,** os choques entre elétron e sua antipartícula iluminaram pela última vez o detector Delphi localizado no acelerador LEP (sigla, em inglês, Grande Colisor de Elétrons e Pósitrons), um túnel de 27 km de comprimento, escavado a 100 metros de profundidade, abaixo de uma planície próxima ao lago Léman, na fronteira da Suíça e França, onde funciona o Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern).

Encerravam-se 11,5 anos de uma extensa coleção de dados sobre as partículas criadas nesses choques de matéria contra antimatéria. Em cada um dos quatro pontos onde foram coletados os dados, há um complexo conjunto de sensores que fotografam os resultados da colisão. São os detectores Aleph, Delphi, L3 e Opal, operados, cada um, por cerca de 400 físicos (ver também nesta edição 'Quatro andares de ciência e tecnologia'). Pesquisadores do CBPF e de outras instituições brasileiras participaram do experimento (ver 'Brasil participou da construção, coleta e pesquisa').

Nos primeiros anos dos experimentos, a energia do LEP foi suficiente para produzir o parente pesado do fóton, a partícula Z zero, indicada comumente pela sigla  $Z^0$ . Essa partícula foi inventada ainda em 1957 pelo físico brasileiro José Leite Lopes, que foi movido essencialmente por considerações estéticas sobre a simetria da natureza.



A  $Z^0$ , juntamente com mais duas partículas ( $W^+$  e  $W^-$ ), são responsáveis pela transmissão da chamada força fraca, que está relacionada com o chamado decaimento radioativo beta (emissão de elétrons pelo núcleo atômico) – sem entrar em detalhes, vale ressaltar que as outras três forças conhecidas são a gravitacional, a eletromagnética e a força forte.

**FATORES EXÓTICOS.** Por sete anos, o Delphi fotografou dezenas de milhões de  $Z^0$ s, permitindo um estudo estatístico de todas as facetas dessa partícula, bem como um teste das previsões feitas com base no chamado Modelo Padrão, um pode- >>>

Figura 1. Delphi, um dos quatro detectores que funcionaram no acelerador LEP, do Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern).



CERN

roso ferramental teórico usado hoje pela física para estudar as partículas subatômicas.

O grau de sensibilidade atingido pela combinação dos quatro detectores do LEP foi tão grande que, na medida da massa do  $Z^0$ , foi necessário levar em conta fatores exóticos do ponto de vista da física das partículas. As marés da Terra (e não do mar!) influenciam o comprimento do anel de colisão, que, por sua vez, deve ser levado em consideração na estimativa dessa massa. Essas marés são deformações na crosta terrestre causadas pela atração gravitacional da Lua.

Outros fatores, como a passagem de trens em uma linha férrea a um quilômetro do anel, provocam pequenas perturbações no campo dos ímãs do anel e também que ser levados em conta. E até mesmo o regime de chuvas em Genebra, onde está localizado o LEP, afeta essas medidas.

**QUARK SUPERPESADO.** Logo no início da operação do LEP, o Delphi e os outros detectores (ou experimentos, como prefe-

rem os físicos) confirmaram, com grande precisão, que devem ser três os tipos de neutrinos existentes na natureza, conforme indicava a previsão do Modelo Padrão – os três tipos de neutrinos (partículas sem carga) são o neutrino do elétron, o neutrino do múon e o neutrino do tau (figura 2).

Outro resultado espetacular dessa fase inicial do experimento foi a

medida da transformação (ou decaimento) do  $Z^0$  em quarks pesados do tipo *bottom* ('parentes' mais pesados dos quarks *up* e *down*, sendo que estes dois últimos formam os prótons e nêutrons)

A precisão dessas medidas permitiu ainda extrair uma previsão para a massa de um presumido quark, o *top*. Esses cálculos foram confirmados pelos experimentos que levaram à descoberta dessa partícula superpesada realizados no acelerador Tevatron, do Fermilab, próximo a Chicago (Estados Unidos). O refinamento das medidas feitas a partir dos dados coletados pelo Delphi mostraram que a massa do *top* calculada teoricamente era praticamente a mesma da partícula real.

Na verdade, esse resultados refletem o poder de previsão dos cálculos teóricos feitos hoje na física, bem como o nível de consistência do próprio Modelo Padrão.

## CAMADAS SE SOBREPÕEM COMO EM UMA BONECA RUSSA

O Delphi, na verdade, é formado por vários detectores com funções distintas, que se sobrepõem como as diversas cascas de uma boneca russa (figura 1). Na camada mais interior, há um detector baseado na tecnologia de microfita embebidas em um substrato de silício que são capazes de medir a posição de passagem de partículas carregadas com a precisão de alguns milésimos de milímetros (microns).

A função desse detector é identificar a existência de vértices secundários, fruto do decaimento de partículas de vida breve que percorrem alguns milímetros a partir do ponto de colisão, até se desfazerem em outras. Seguem-se duas camadas de detectores com a função de identificar e medir as trajetórias das partículas car-

regadas produzidas na colisão.

A próxima casca é um detector de radiação Cerenkov, emitida quando uma partícula viaja com velocidade superior à da luz naquele meio. Esse equipamento é útil na identificação da natureza das partículas, separando prótons de méson  $k$  (káons) e mésons  $\pi$  (píons) – as duas últimas partículas com massa intermediária entre os elétrons e os prótons.

Todos esses subdetectores internos procuram minimizar, em seu desenho e sua confecção, a quantidade de matéria, permitindo que a maioria das partículas os atravessem sem muitas perdas.

O próximo detector é desenhado para identificar e medir a presença de fótons (partículas de luz) e elétrons, destruindo-os nesse processo. Esse calorímetro eletromagnético é fabricado com grande quanti-

dade de chumbo, material que essas partículas não conseguem atravessar (diz-se que é um material opaco). O detector é envolto então por um cilindro que é um ímã supercondutor (um solenóide) que gera um campo magnético muito homogêneo em seu interior.

Dois componentes completam a estrutura de cascas. O primeiro, denominado calorímetro hadrônico, são na verdade placas de aço instrumentadas, mas com função primordial de criar um caminho de retorno para o campo magnético no interior do detector.

O outro são os detectores de mésons  $\mu$  (ou múons), partículas capazes de sobreviver a todos esses percalços, sendo esta a razão pela qual esse conjunto de detectores compõe as camadas mais externas do Delphi.

## BRASIL PARTICIPOU DA CONSTRUÇÃO, COLETA E PESQUISA

Desde 1988, o CBPF vem liderando um grupo formado por físicos também da PUC Rio de Janeiro e da Universidade Estadual do Rio de Janeiro na construção e operação do experimento Delphi.

Esse grupo participou tanto da busca por novas partículas (bósons de Higgs, por exemplo) quanto da investigação sobre as propriedades das já detectadas. Também participou extensivamente do programa técnico

co do construção do detector, realizando tarefas como desenvolvimento e manutenção de programas de computadores para a análise de dados, bem como para a simulação e reconstrução das colisões.

Os integrantes do Grupo Delphi constam como co-autores de todos os cerca de 200 artigos publicados a partir dos dados coletados pelo Delphi. Essas publicações tiveram um alto índice de citações por trabalho. A colaboração em torno do

experimento Delphi envolve cerca de 50 instituições espalhadas pelo mundo inteiro, sendo resultado do trabalho de centenas de físicos, engenheiros e técnicos.

Mesmo com o encerramento das colisões do Delphi, os trabalhos de análise de dados coletados continuam e são uma excelente oportunidade para que estudantes façam suas teses, dada a profusão de dados para serem analisados.

**220 PRÓTONS DE ENERGIA.** O detector Delphi é um cilindro de 3,5 mil toneladas, com dez metros de diâmetro e com dimensão semelhante em sua extensão. Tem em seu centro o lócus, onde ocorrem as colisões de matéria e antimatéria, no interior do tubo que isola os feixes de partículas (ver 'Camadas se sobrepõem como em uma boneca russa').

A partir de 1996, o LEP passou por uma reforma – foram instalados equipamentos denominados cavidades de radiofrequência supercondutoras –,

o que permitiu que sua energia fosse gradualmente aumentada, até atingir, três anos depois, a casa de 209 bilhões de elétrons-volt (ou 209 GeV), energia que corresponde à massa de cerca de 220 prótons!

Quando a energia das colisões é semelhante à energia representada pela massa do  $Z^0$ , ocorre uma produção copiosa dessas partículas, devido a um fenômeno da física denominado ressonância. Fora da faixa de energia que leva à ressonância, o número de colisões por unidade de tempo cai substancialmente. No entanto, nesses patamares de energia é possível criar pares dos outros bósons vetoriais, os  $W^+$  e  $W^-$ , e também pares de  $Z^0$ , permitindo testes mais precisos das previsões do Modelo Padrão.

**SENSO DE FRUSTRAÇÃO.** Ao longo de sua história, um dos principais objetivos do experimento Delphi foi testar a existência de partículas como o bóson de Higgs e as partículas supersimétricas, mas, até o final da coleta de dados, não foram encontradas evidências da presença dessas partículas.

No último período de tomada de dados no Delphi, foram coletados dois exemplares de eventos que poderiam ser inter-

pretados como evidência para o bóson de Higgs, esta uma partícula que seria responsável por dar origem à massa de todas as outras partículas. No entanto, só dois eventos não são suficientes para estabelecer uma descoberta. Outros detectores encontraram também evidências de mesma natureza.

O encerramento das operações do LEP é motivado pela construção, dentro do mesmo túnel, de um novo acelerador de prótons, o LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons), que será capaz de atingir energias muito maiores. O LHC deverá entrar em operação ao final de 2005.

A possibilidade da descoberta do Higgs ao final do funcionamento do LEP deixou na comunidade de físicos ligados aos quatro detectores um certo senso de frustração. Só o tempo e as medidas que serão feitas no LHC permitirão verificar se os tênues sinais que surgiram nos últimos dias do LEP eram realmente registros dos bósons de Higgs ou eram apenas flutuações nos dados, como já ocorreu outras vezes.

O LEP e o Delphi deixam um belo legado de medidas que, com muita precisão, serviram para testar a validade do Modelo Padrão. Os dados produziram ainda cerca de mais de duas centenas de trabalhos publicados em revistas especializadas. ■

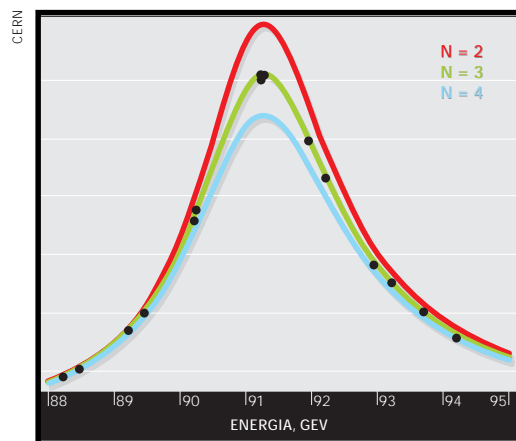


Figura 2. Com os dados coletados pelo Delphi foi possível confirmar, com grande precisão, que são três os tipos de neutrinos existentes na natureza, conforme previsão teórica do Modelo Padrão. Os dados experimentais (pontos pretos) coincidem com a reta relativa a  $N=3$ , onde  $N$  representa a quantidade de tipos de neutrinos. A unidade do eixo horizontal corresponde a bilhões de elétrons-volt (GeV).



# Modelagem de sistemas naturais

Tradicionalmente voltada para a meteorologia, a área de modelagem de sistemas naturais, hoje sob forte influência das abordagens interdisciplinares e com o auxílio de poderosas ferramentas matemáticas e computacionais, já engloba temas vitais para a ecologia do planeta, como massas de água e manejo de florestas.

**A construção** de modelos teóricos tem sido há muito usada em vários campos do conhecimento, da sociologia, biologia e medicina à física, química e mesmo matemática. No passado, porém, essa abordagem costumava ser praticamente 'estanque'; isto é, mantinha-se dentro dos limites de cada uma dessas áreas.

Hoje, no entanto, a modelagem de sistemas, sejam eles naturais ou artificiais, é marcada por um alto grau de interdisciplinaridade, o que confere aos modelos maior poder de previsão teórica e proximidade com os dados experimentais. E isso ocorre, em parte, graças ao fato de a modelagem de sistemas reunir profissionais que, até pouco tempo atrás, trabalhavam praticamente isolados.

**LAGOS, RIOS E BACIAS.** Vejamos, por exemplo, o caso da limnologia, um tema extremamente ativo tanto em sua abordagem experimental quanto teórica. Trata-se da descrição do comportamento de lagos, rios e bacias hidrográficas, o que, sem dúvida, faz desse tema um assunto de amplo interesse para o Brasil, dada a diversidade de climas e regiões geográficas no país, bem como para a área de modelagem de sistemas naturais.

Na abordagem física mais clássica, pode-se obter uma boa descrição da dinâmica do comportamento da massa de água de um lago caso sejam conhecidos seu contorno geométrico, bem como a direção e a velocidade do vento em cada ponto de sua borda.

Se também for conhecido o perfil de seu fundo, podemos ir além: obter a dispersão de produtos dissolvidos em determinada região do lago – para isso, os pesquisadores usam um ferramental matemático de amplo alcance, as equações de Navier-Stokes. Os produtos dissolvidos na água não precisam ser necessariamente poluentes. Podem ser também compostos nitrogenados produzidos pela ação biológica de microrganismos existentes nesses ambientes aquáticos.

Esses temas envolvem apenas o estudo do movimento dos fluidos em escala mesoscópica (escala de 10 quilômetros). Por outro lado, a presença de fitoplâncton

e zooplâncton requer o uso de modelos mais específicos. A descrição dessa comunidade, respectivamente, de pequenos animais e vegetais aquáticos exige, por exemplo, o estudo dos efeitos da absorção de luz na descrição das atividades fotossintéticas do fitoplâncton.

**PRESAS E PREDADORES.** O modelo mais adequado para sistemas de interesse limnológico que tenham diversos subsistemas em interação é o chamado modelo do reservatório generalizado, que pode ser definido como uma coleção de compartimentos entre os quais há troca de substâncias (produtos dissolvidos na água etc.) e/ou produtos (plantas, animais etc.).

Em sua versão original, esse modelo continha apenas o número de ocupação dos compartimentos (animais e plantas), considerando assim a total uniformidade espacial entre cada um dos compartimentos. Porém, sabemos que essa uniformidade é uma hipótese que deve ser testada para cada sistema natural que se quer modelar.

Em certos casos, efeitos de transporte entre os compartimentos devem ser levados em conta, porém isso obviamente aumenta a complexidade do modelo do ponto de vista matemático. Um exemplo no qual esses efeitos devem ser incluídos é o caso da modelagem de animais migrando ao longo de uma costa, como no caso de crustáceos, pois o número de ocupação de cada compartimento varia com o passar do tempo.

Uma aplicação possível do modelo do reservatório generalizado é dado pela descrição de redes tróficas (ou redes de alimentação) constituídas por diversos peixes, entre presas e predadores, que vivem em grandes massas de água nas quais há nutrientes suficientes para os peixes não predadores.

Alguns peixes usam como defesa regiões protegidas dessa massa

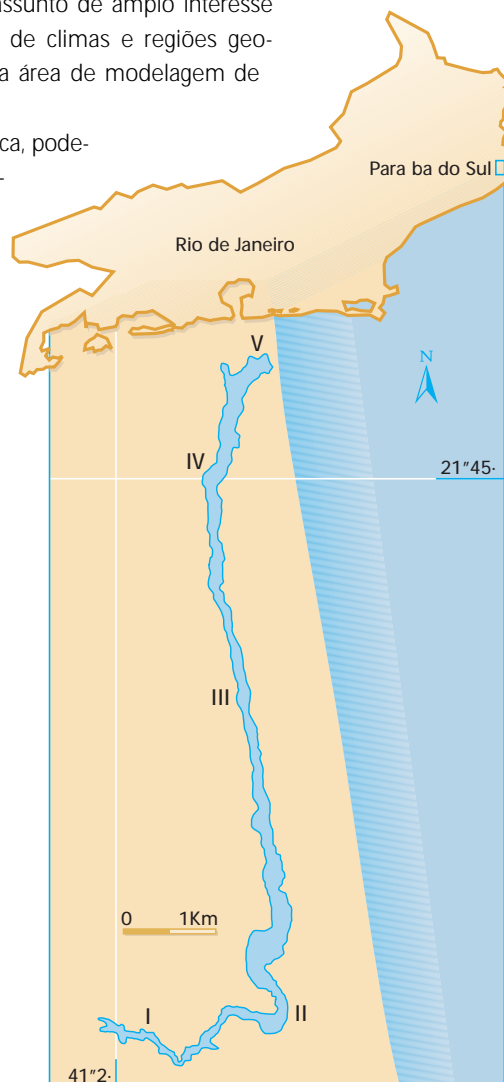


Figura 1. Localização das cinco estações de coleta da lagoa Iquipari, no norte fluminense, em mapa baseado em foto de satélite fornecida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

de água – um lago ou represa –, onde podem ficar e se alimentar ao abrigo de predadores. Nesse caso, portanto, a ocupação dos compartimentos passa a ter uma dependência espacial explícita, porque os compartimentos não são ocupados de forma uniforme.

**BARREIRA DE AREIA.** Exemplos de ecossistemas de grande interesse tanto para a pesquisa quanto a modelagem são as lagoas de Iquipari e Grussaí, localizadas na região do norte fluminense (figura 1). Elas têm uma conexão com o mar que, na maior parte do ano, permanece fechada por uma barreira de areia.

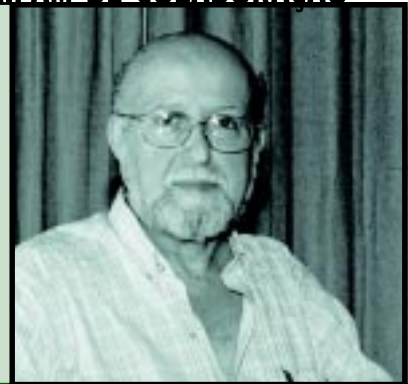
A comunidade de pescadores locais, no entanto, abre a barreira em certos meses, para evitar os inconvenientes resultantes das inundações das casas próximas às lagoas. Outra razão para a abertura é permitir a renovação do pescado, consumido pela população local.

Após a abertura da barra, a dinâmica do ecossistema se altera muito até a próxima abertura, havendo, portanto, necessidade de se efetuarem medidas e modelagens sistemáticas em função do tempo.

A descrição desses ecossistemas exige pelo menos uma modelagem com duas escalas: a solução das equações de

## QUATRO INSTITUIÇÕES PARTICIPAM DE COLABORAÇÃO

O Grupo de Modelagem de Sistemas Naturais do CBPF mantém ampla e profícua colaboração com o Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a Universidade Federal de Santa Maria (RS) e a Universidade Estadual do Norte Fluminense.



Affonso Augusto Guidão Gomes

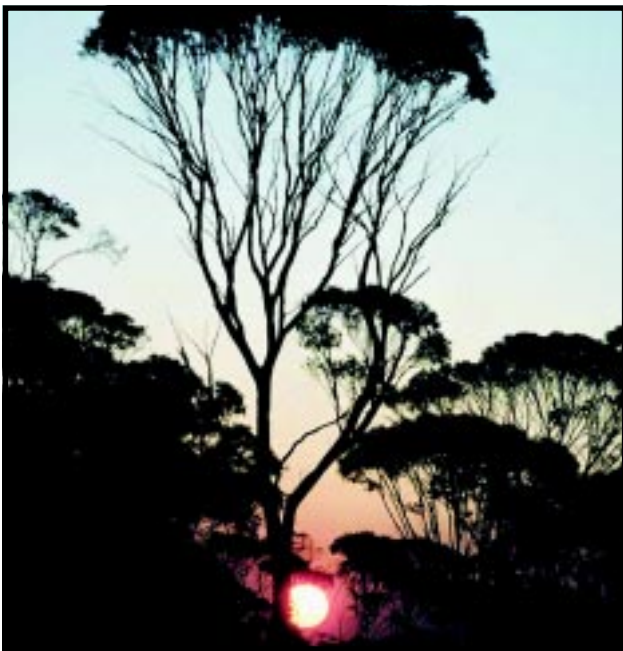
Navier-Stokes para o lago, e o uso do modelo do reservatório para descrever a dinâmica do fitoplâncton, zooplâncton e macrófitas (plantas aquáticas), juntamente com a dinâmica da rede trófica dos peixes.

Esses modelos devem ser estudados em função do tempo entre aberturas consecutivas da barreira de areia. Note-se que, apesar das escalas do lago serem mesoscópicas, os processos fotossintéticos que ocorrem com o fitoplâncton exigem uma descrição envolvendo as escalas microscópicas das reações fotossintéticas.

O exemplo de Iquipari ou Grussaí ilustra bem a idéia central do processo de modelagem de sistemas naturais: dado um ecossistema, estão sempre presentes parâmetros que variam em função do espaço e do tempo. A modelagem das duas lagoas teve que ser adaptada ao modelo geral do reservatório devido a essa série de peculiaridades.

**ÁGUAS E FLORESTAS.** Vale ressaltar que, por muito tempo, os problemas envolvendo a modelagem de sistemas naturais foram abordados apenas através de métodos puramente descritivos. Só mais recentemente foram introduzidas as chamadas abordagens explicativas, incluindo o método do reservatório generalizado. Assim, sistemas naturais descritos pelos métodos explicativos deixaram de ser modelados como simples ‘caixas-pretas’, passando a incluir descrições dos processos envolvidos em sua dinâmica. E mais importante: essa abordagem passou a determinar as escalas relativas ao espaço e ao tempo dos ecossistemas nas quais esses processos ocorrem.

Hoje, o impacto das abordagens interdisciplinares na descrição de sistemas naturais é internacionalmente reconhecido. Com as novas perspectivas sobre a modelagem de sistemas, bem como o aprimoramento do ferramental matemático e computacional, os temas de interesse da área deixaram de ser apenas a meteorologia, para encampar questões vitais para a ecologia do planeta, como massas de água, manejo de florestas, dinâmica da água em solos e precipitação atmosférica. ■



Atualmente, a área de modelagem de sistemas passou a encampar questões vitais para a ecologia do planeta, como o manejo de florestas.

# Fenômenos e materiais magnéticos

Os fenômenos magnéticos fascinam tanto por seus aspectos científicos básicos quanto por inúmeras possibilidades que apresentam para aplicações práticas, como na fabricação de motores, alto-falantes, microfones, memórias, discos rígidos, fitas magnéticas, CDs regraváveis, entre outros equipamentos presentes em nosso cotidiano.

**O leitor saberia identificar** em sua casa peças e partes de utensílios domésticos que utilizam algum material magnético para seu funcionamento? Com certeza, bastará dar uma olhada em volta para encontrar etiquetas de calendários 'colados' à geladeira, alto-falantes da televisão e dos aparelhos de som, interfone, portão automático, disquetes de computador, fitas de gravadores, motores de eletrodomésticos, brinquedos, fechaduras, alarmes etc. E poderíamos estender esta lista sem muito esforço. Só para citar mais um exemplo, um automóvel moderno emprega cerca de 200 peças contendo materiais magnéticos.

Com essa gama de utilidades, os materiais magnéticos geraram um mercado que movimenta altas somas de dinheiro. Em uma das mais importantes aplicações do magnetismo, a gravação magnética, essas cifras chegam a US\$ 100 bilhões ao ano – a figura 1 mostra esquema de gravação. A produção de materiais magnéticos utiliza mais recursos em todo o mundo do que a fabricação de semicondutores, materiais básicos usados na construção de circuitos integrados e chips de computadores.

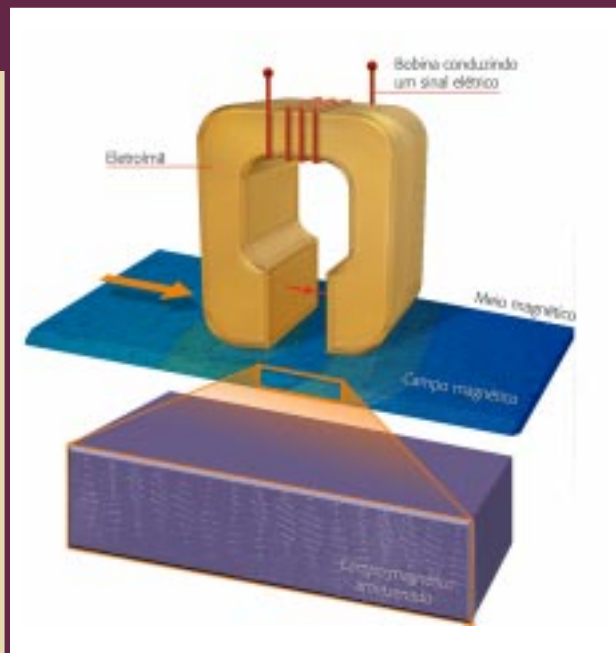


Figura 1. Esquema mostra como ocorre a gravação em meio magnético. O sinal elétrico que chega à bobina induz no eletroímã um campo magnético que, por sua vez, é responsável por armazenar (gravar) no meio magnético a informação transportada pelo sinal.

&gt;&gt;&gt;

**FASCINANTE DIVERSIDADE.** O magnetismo está presente também em nossas vidas de forma mais sutil. A Terra em si é um gigantesco ímã, cujo campo magnético se faz sentir, por exemplo, na agulha de uma bússola. Campos magnéticos estão também presentes em vários objetos celestes, como planetas, estrelas, quasares, pulsares, bem como em estruturas muito maiores, como galáxias (figura 2).

Alguns insetos e bactérias, bem como algumas aves, orientam-se espacialmente segundo as direções desse campo utilizando-se de materiais magnéticos que sintetizam em seus organismos (ver também nesta edição 'Biominaerais magnéticos').

O campo da Terra serve também de blindagem magnética contra o constante bombardeio de partículas carregadas eletricamente que chegam do Sol, o chamado 'vento solar'. Nos períodos de maior atividade solar, essas partículas produzem as auroras boreais, fenômeno que pode afetar seriamente as telecomunicações (figura 3).

Como vemos, o magnetismo influi em nossas vidas sob diferentes aspectos: é parte fundamental da tecnologia moderna; afeta organismos vivos e, conseqüentemente, o meio ambiente; é produzido pelo próprio planeta.

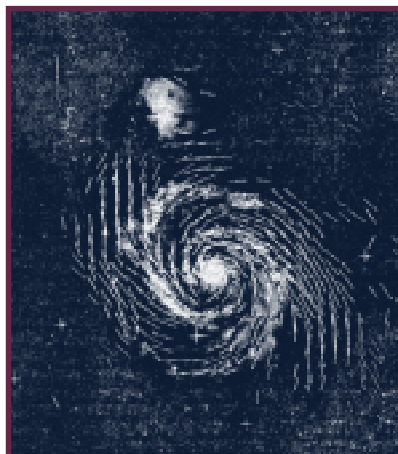


Figura 2. Direção das linhas de campo magnético em uma galáxia.

Essa fascinante diversidade de manifestações tem levado cientistas, engenheiros e técnicos ao estudo do magnetismo e de suas aplicações.

**DOCE E DURO.** Para cada aplicação específica, é necessário um material magnético com as características físicas adequadas. Uma maneira de classificar essas características consiste em submeter a amostra estudada à ação de um campo magnético e observar sua resposta magnética – isso é feito através de quantificação de duas grandezas físicas, chamadas permeabilidade e suscetibilidade magnética.

Por exemplo, o material usado em um núcleo de transformador deve ser capaz de apresentar uma resposta intensa à ação do campo magnético gerado pelos enrolamentos do transformador, retornando ao estado inicial de magnetização nula quando esse campo é retirado. Dizemos que um material com essas características é magneticamente 'macio' (ou 'doce').

Ao contrário, o material magnético de um ímã permanente, como o que deve operar em um motor elétrico ou em um alto-falante, deve sustentar sua magnetização mesmo na ausência de um campo externo. Nesse caso, são denominados magneticamente 'duros'.

CEIDIOS PELOS AUTORES

## PARTE EXPERIMENTAL E TEÓRICA SE UNEM NO LABMAG

O Laboratório de Magnetismo (LabMag) do CBPF estuda uma vasta gama de materiais. Normalmente, essas amostras são materiais metálicos como metais simples, ligas metálicas e compostos intermetálicos formados a partir dos chamados metais de transição e terras raras. Em geral, são dotados de estrutura cristalina, mas também são estudados materiais amorfos (sem estrutura cristalina), obtidos pelo resfriamento rápido do material fundido.

Outros materiais se apresentam sob a forma de grãos magnéticos microscópicos – para se ter uma idéia, em um milímetro caberiam cerca de 100 mil

deles enfileirados – e de películas metálicas com espessura na mesma ordem de grandeza.

Várias técnicas experimentais nos permitem medir nesses materiais grandezas físicas como resistividade elétrica, magnetização e suscetibilidade magnética, calor específico, campos magnéticos que atuam sobre os núcleos atômicos, momentos magnéticos atômicos, entre outras. Além da parte experimental, nosso grupo também desenvolve pesquisa teórica, com a finalidade de aplicar modelos matemáticos à descrição de resultados experimentais.

Temos também atuado na área de instrumentação científica, construindo

equipamentos – ou partes deles – para medidas físicas e também programas de computador para o controle de experimentos e análise de dados experimentais. Por exemplo, o sistema de medida de ressonância magnética nuclear de nosso laboratório foi construído no CBPF.

O LabMag engloba um grupo de ressonância magnética nuclear, um laboratório de magnetometria e um laboratório de magnetoóptica. Além das técnicas experimentais disponíveis no CBPF, utilizamos, em regime de colaboração, equipamentos no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas (SP), e no Grupo de Aceleradores da PUC Rio de Janeiro.

**GIGANTE E COLOSSAL.** Há uma importante correspondência entre as propriedades magnéticas de um material e suas propriedades de transporte. Por exemplo, se passarmos uma corrente elétrica por um fio de cobre na ausência de um campo magnético, verificaremos uma resistência elétrica menor que a observada se um campo magnético estiver presente.

Esse fenômeno é chamado efeito magnetorresistivo, e verifica-se que a magnetorresistência – ou seja, a resistência elétrica ocasionada pelo campo magnético – será máxima se o campo estiver orientado perpendicularmente à direção do fluxo de corrente.

Recentemente, descobriu-se uma classe de materiais magnéticos em que esse efeito é tremendamente amplificado. O efeito passou a ser conhecido como magnetorresistência gigante e, em alguns casos, magnetorresistência colossal. Ambos têm vastas possibilidades de aplicações em dispositivos e sensores magnéticos, como, por exemplo, em cabeças de leitura de gravadores.

Existe também uma interessante relação entre magnetismo e calor. Ela é conhecida há muito tempo, mas só agora



Figura 3. Em períodos de maior atividade solar, as partículas carregadas eletricamente que atingem o campo magnético terrestre produzem a chamada aurora boreal, fenômeno que pode interferir com as telecomunicações.

começa a ser explorada para finalidades práticas. Essencialmente, quando um material é magnetizado pela ação de um campo magnético, ele libera calor e, portanto, se resfria! Ao contrário, se um material magnético que se encontra inicialmente magnetizado por um campo for desmagnetizado, ele absorve calor e se aquece.

**GELADEIRAS E TRENS.** Analogamente ao que ocorreu na pesquisa da magnetorresistência, uma nova classe de materiais foi descoberta recentemente, a qual apresenta o efeito magnetocalórico gigante. Com esses materiais, é possível, através da realização de ciclos magnetização-desmagnetização, extrair calor de um objeto que esteja em contato físico com ele.

O efeito magnetocalórico está começando a ser usado em protótipos de geladeiras magnéticas, que são mais eficientes e econômicas que as convencionais. Além disso, não são prejudiciais ao meio ambiente, pois não utilizaram gases que destroem a camada de ozônio terrestre.

Um interessante fenômeno magnético é a levitação magnética, ou seja, a possibilidade de se sustentar um objeto através da repulsão magnética. A aplicação mais espetacular desse efeito

&gt;&gt;&gt;

Colaboram ainda com o LabMag pesquisadores da Universidade do Estado do Rio de Janeiro e da Universidade de Nova Iguaçu, bem como da Universidade de Strasburgo (França) e da Universidade de Aveiro (Portugal).

Além de pesquisadores visitantes, nosso grupo mantém alunos de mestrado e doutorado, bem como outros projetos – teóricos, experimentais e de instrumentação – em nível de iniciação científica. Hoje, no Brasil, há cerca de 30 instituições que se dedicam à pesquisa em magnetismo (figura 5).

Figura 5. A pesquisa de magnetismo no Brasil. Ao lado das siglas das instituições, aparece entre parênteses o número de pesquisadores.





Figura 4. Trem que emprega o princípio da levitação magnética.

reside na construção de trens ultra-rápidos que se deslocam sem contato com os trilhos.

A realização prática da levitação magnética pode ser feita empregando supercondutores (materiais que resfriados apresentam resistência elétrica nula) ou ímãs permanentes. Existem atualmente no mundo diversos projetos de trens empregando levitação magnética, com potencial de viajar a uma velocidade de 500 km/h (figura 4).

É provável que o interesse da humanidade pelo magnetismo tenha começado há milhares de anos, quando o homem conheceu o poder dos ímãs sobre certos materiais. De lá para cá, vários novos fenômenos foram descobertos, explicados e muitos se transformaram em utensílios sem os quais nosso dia-a-dia seria muito mais difícil. Outros fenômenos, recém-descobertos, estão aos poucos revelando aplicações intrigantes e promissoras.

E tudo isso é apenas parte do fascinante mundo do magnetismo. ■

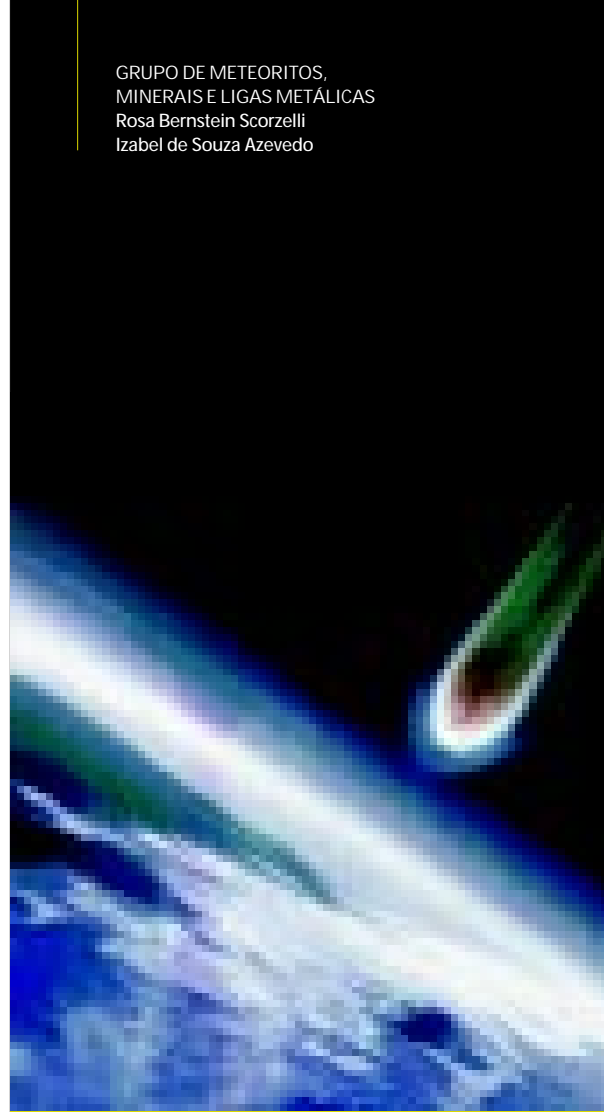


Figura 1. Representação artística da entrada de um meteoróide na atmosfera terrestre.

EXTRAÍDO DE HARRY Y. MCSWEEEN, JR. "METEORITES AND THEIR PARENT PLANET". CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. 1999.



Alberto P. Guimarães (sentado, centro) e colaboradores.

# Mensageiros do espaço

Os meteoritos representam material extraterrestre que percorreu o espaço cósmico em torno do Sol por 4,5 bilhões de anos antes de colidir com a Terra. O estudo desses viajantes espaciais tem contribuído enormemente na elucidação da origem e da evolução do Sistema Solar.

**A Terra é constantemente atingida** por objetos sólidos que circulam pelo espaço. São os chamados meteoróides. Quando esses corpos entram na atmosfera terrestre, passando agora a ser denominados meteoros, todos eles – inclusive os menores, com massas abaixo de uma fração de grama – são aquecidos por fricção até chegarem à fusão e à incandescência, o que produz traços luminosos. Já os fragmentos desses corpos que não se vaporizam completamente, chegando à superfície da Terra, recebem o nome de meteoritos (figura 1).

Embora hoje se compreenda que a queda de meteoritos seja consequência natural de processos do Sistema Solar, no passado ela foi atribuída à intervenção divina ou mesmo negadas (ver 'Físico alemão provou origem cósmica'). Atualmente, estudos científicos e análises sofisticadas de meteoritos revelam importantes informações sobre o Sistema Solar e seu entorno.

**PEREGRINAÇÃO NO ESPAÇO.** As teorias modernas baseiam-se em informações científicas fornecidas principalmente pela astronomia, astrofísica e meteorítica. Esses objetos extraterrestres são reconhecidamente os mais antigos e mais primitivos pedaços

de matéria planetária aos quais temos acesso atualmente – um bilhão de anos mais antigos que a mais antiga rocha terrestre conhecida. Há evidências de que alguns meteoritos sobreviveram praticamente inalterados desde a origem dos planetas.

Meteoritos têm sua origem em asteróides, bem como em cometas que liberam fragmentos no espaço atraídos pela gravidade terrestre. Há ainda meteoritos cuja origem está em outros corpos celestes, na Lua ou em Marte, por exemplo.

Esses corpos iniciam, então, uma vida de peregrinação, perambulando pelo espaço por milhões de anos, à mercê da ação de forças gravitacionais, magnéticas ou elétricas, antes de serem atraídos pela gravidade de um planeta, satélite ou mesmo pelo Sol.

**FOGO NO CÉU.** Os meteoritos são violentamente freados pela atmosfera terrestre, na qual entram com velocidades que variam de 15 km/s a 30km/s. Os atritos a que são submetidos provocam um aquecimento de sua superfície, fazendo com que a temperatura nela chegue a milhares de graus. Um fenômeno luminoso é então visível da Terra: a chamada estrela cadente, no caso de uma poeira; e uma bola de fogo muito brilhante, quando se trata de um meteorito.

&gt;&gt;&gt;



Figura 2. Cratera causada pelo impacto de um meteorito no estado do Arizona (Estados Unidos). O local é conhecido por cratera de Barringer, que tem 1.300 metros de diâmetro e 175 metros de profundidade.

A travessia pela atmosfera modifica a superfície do meteorito, que, submetido a enorme 'estresse' mecânico e térmico produzido pela frenagem, perde matéria na forma de vapor e poeira. Freqüentemente, fragmenta-se em milhares de pedaços, cuja superfície se cobre de uma crosta (crosta de fusão) e, às vezes, com buracos característicos (regmaglitos), permanecendo intacto seu interior.

**DUROS NA QUEDA.** Os meteoritos gigantes, com mais de 10 mil toneladas, são muito pouco desacelerados quando atravessam a atmosfera terrestre. E assim chocam na Terra com extrema violência, formando as crateras de impacto (figura 2).

Índices geológicos e mineralógicos permitem identificar esse impactos, que, ao produzirem temperaturas e pressões muito elevadas, modificam as rochas. Esses choques, que cavam crateras de diâmetro superior a dez quilômetros, produzem níveis brutais de energia. Assim, ocorre uma violenta elevação de temperatura no material terrestre da zona de impacto, que se funde, vaporiza e projeta estilhaços de tamanhos variados a centenas e até milhares de quilômetros da cratera. Essas rochas fundidas e vitrificadas são chamadas tectitos.

Diversos indícios levam à hipótese segundo a qual, 65 milhões de anos atrás (ou 65 Ma, na linguagem da área), um desastre ecológico tenha sido provocado pela queda de um corpo celeste de muitos quilômetros de diâmetro. É atribuído a esse evento o desaparecimento de numerosas espécies vivas, em particular o dos dinossauros.

Graças a perfurações petrolíferas realizadas na península do Yucatan (México), bem como à observação de anomalias no campo gravitacional terrestre naquela região, a cratera foi localizada, no vilarejo de Chicxulub. A datação das rochas encontradas durante a perfuração permitiu datar o impacto em 65 Ma.

## FÍSICO ALEMÃO PROVOU ORIGEM CÓSMICA

Da mais remota história à Renascença, os meteoritos foram interpretados como fenômenos místicos. Filósofos da Grécia Antiga buscaram explicações científicas, embora não acreditassem na origem cósmica desses fenômenos.

Em 1492, a queda testemunhada de um meteorito na Alsácia obteve grande repercussão e motivou, pela primeira vez, a elaboração de um documento relatando um impacto. Mesmo três séculos depois, numerosas publicações ainda faziam referência ao meteorito d'Ensisheim, trazendo ilustrações de sua queda.

No século 18, embora o conhecimento do fenômeno não tenha progredido, já se dispunha de elementos de estudo. A época foi marcada por

uma recusa unânime em aceitar uma origem celeste ou mesmo atmosférica para os meteoritos, pon-do-se em dúvida a veracidade das quedas já observadas.

Em 1777, a análise da pedra de Lucé pelo químico francês Antoine Lavoisier (1743-1794) não modificou as teorias vigentes. Ao final daquele século, uma série de fatos vão contribuir para o reconhecimento do fenômeno, como o testemunho de numerosas quedas, análises químicas e mineralógicas de meteoritos, bem como os trabalhos do físico alemão Ernst Chladni (1756-1827).



O físico alemão Ernst Chladni (1756-1827), considerado pai da meteorítica.

Chladni, considerado pai da meteorítica, analisou, sem idéias preconcebidas, o 'ferro de Pallas' (massa de 700 Kg encontrada na Sibéria), bem como os relatos de sua queda. Seus resultados demonstram que as massas de pedra ou de ferro não só podem cair do céu, com também provêm do espaço. Suas idéias, revolucionárias para a época, continuam muito próximas das teorias atuais.

Várias quedas espetaculares ocorreram em diversos países na passagem

**ACHADOS E CAÍDOS.** Os meteoritos são as mais antigas rochas conhecidas do Sistema Solar. A maior parte delas apresenta estruturas físicas muito diferentes das rochas terrestres. A análise de suas características químicas, mineralógicas e de sua textura permite classificá-los em diferentes tipos.

Apenas uma pequena proporção de meteoritos são coletados imediatamente após a queda – durante o século 20, foram seis meteoritos por ano. Estes são chamados ‘caídos’. Já os meteoritos recuperados muito tempo depois da queda ganham o nome de ‘achados’. No total, são conhecidos até o presente 3.620 meteoritos: 980 são quedas observadas (‘caídos’) e 2.640 são ‘achados’ – excluindo os encontrados na Antártica, cerca de 5 mil.

Os meteoritos mais primitivos, os condritos (87% das quedas), são contemporâneos da formação do Sistema Solar (4,56 Ma). Originaram-se de corpos celestes (asteróides ou planetas) não modificados. São agregados contendo pequenas esferas denominadas cóndrulos, e sua composição qui-

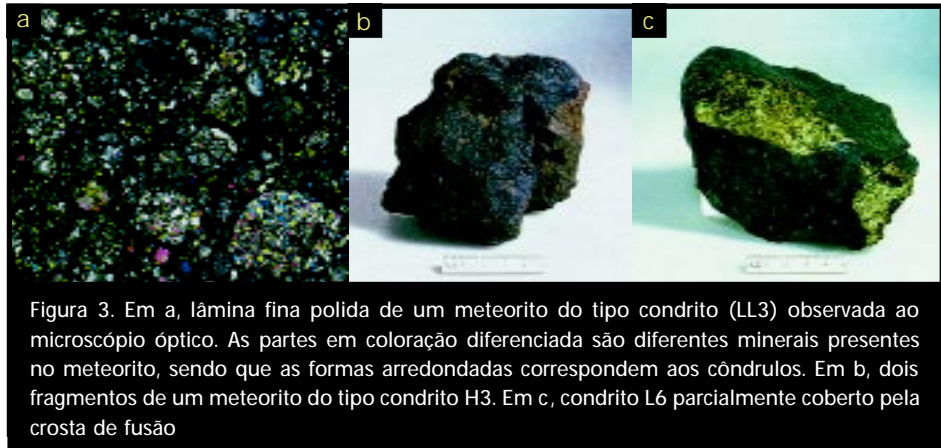


Figura 3. Em a, lâmina fina polida de um meteorito do tipo condrito (LL3) observada ao microscópio óptico. As partes em coloração diferenciada são diferentes minerais presentes no meteorito, sendo que as formas arredondadas correspondem aos cóndrulos. Em b, dois fragmentos de um meteorito do tipo condrito H3. Em c, condrito L6 parcialmente coberto pela crosta de fusão

mica, eliminando os elementos voláteis, é semelhante à do Sol. Testemunhas dos primeiros instantes da formação do Sistema Solar, representam uma fonte de informações única para a meteorítica (figura 3).

O restante dos meteoritos são denominados diferenciados e englobam tanto os chamados acondritos quanto os meteoritos de ferro. Ambos originam-se em asteróides ou planetas diferenciados quimicamente do Sol. Nos acondritos, o material primitivo, homogêneo, fundiu-se a temperaturas elevadas durante o processo térmico, fazendo com que os elementos químicos se separassem, formando camadas distintas, de-

do século 18 para o 19, quando foram estabelecidos e reconhecidos os fundamentos do conhecimento sobre os meteoritos e sua origem extraterrestre. Abriu-se, então, uma nova era para a pesquisa científica desses objetos.

Entalhe feito em madeira representando a queda do meteorito d'Ensisheim, que ocorreu em 1492 na Alsácia.

REPRODUÇÃO



## APRENDA A RECONHECER UM METEORITO

Numerosos objetos podem ser confundidos com meteoritos. Portanto, é importante observar certas particularidades, tais como:

- >>> O objeto está recoberto por uma superfície negra ou marrom (crosta de fusão)?
- >>> É sólido, sem poros ou vesículas ocas?
- >>> Pesa muito proporcionalmente ao tamanho? (os meteoritos metálicos são mais densos se comparados com a maioria das rochas terrestres)
- >>> Se houver uma rachadura, observe o interior. Ele é metálico, prateado?
- >>> É diferente das demais rochas da região?
- >>> É magnética, isto é, atrai um ímã ou desvia uma agulha de bússola?

Se você respondeu ‘sim’ à maioria destas perguntas, pode ser que tenha achado um meteorito e então valeria a pena analisá-lo. Nesse caso, sugerimos que a amostra seja levada a uma universidade, instituto de pesquisa ou museu mais próximo.

>>>

nominadas núcleo, manto e crosta (esta a mais superficial delas)

Os meteoritos de ferro (5,2% das quedas) consistem quase essencialmente de ligas metálicas de ferro-níquel, e a maioria provém do núcleo dos corpos que deram origem a eles (figura 4).

**VIDA EM MARTE.** Recentemente, um meteorito foi responsável por uma das notícias de maior impacto público das últimas décadas. Achado na Antártica e tendo sua origem atribuída a Marte, a diminuta rocha foi a base para que cientistas americanos anunciassem fortes evidências de que tenha existido vida primitiva naquele planeta 3,6 bilhões de anos atrás. Além de moléculas orgânicas, foram encontrados nele vestígios minerais típicos de atividade biológica e, possivelmente, fósseis microscópicos de organismos semelhantes a bactérias.

Ao estudar as informações transportadas pelos meteoroi-

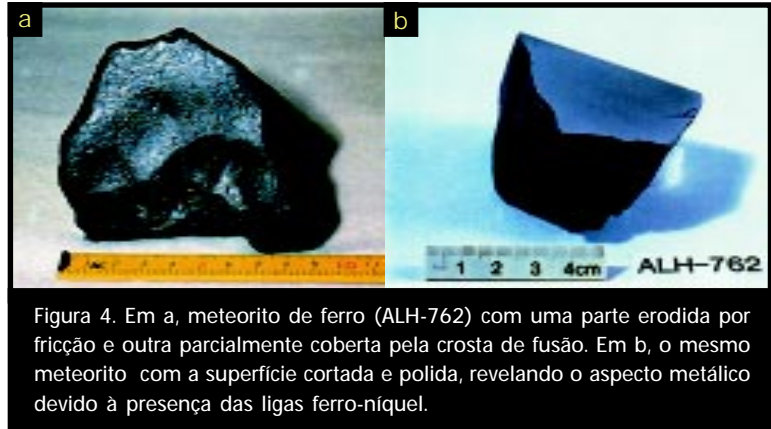


Figura 4. Em a, meteorito de ferro (ALH-762) com uma parte erodida por fricção e outra parcialmente coberta pela crosta de fusão. Em b, o mesmo meteorito com a superfície cortada e polida, revelando o aspecto metálico devido à presença das ligas ferro-níquel.

tos, a ciência tem respostas não só para a origem e a evolução do Sistema Solar, mas também para questões como as extinções em massa das espécies e a composição e natureza dos asteróides. E quem sabe não será um desses mensageiros do espaço que nos trará a resposta para uma de nossas dúvidas mais inquietantes: estamos sozinhos no universo? ■

## PESQUISAS COMEÇARAM AINDA NA DÉCADA DE 70

O estudo de meteoritos no CBPF foi introduzido pelo químico brasileiro Jacques Danon (1924-1989) ainda na década de 1970, dando início a um trabalho eminentemente interdisciplinar, envolvendo intensa colaboração entre físicos, químicos, geólogos e astrônomos nacionais e estrangeiros.

Desde então, nosso grupo tem contribuído na elucidação de questões importantes relacionadas a esses objetos, que representam as rochas conhecidas mais antigas do sistema solar. Estes corpos extra-terrestres constituem um laboratório único para o estudo de minerais e ligas ferro-níquel, dando acesso a taxas de resfriamento da ordem de 1 grau por

5 bilhões de anos, o que permite explorar as fases metaestáveis e de equilíbrio a baixas temperaturas.

Investigamos suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, visando conhecer efeitos térmicos e de choque, processos ordem-desordem, taxas de resfriamento, comportamento invar do sistema ferro-níquel, propriedades magnéticas etc., através de várias técnicas como espectroscopia Mössbauer, microscopia óptica e eletrônica, difração de

raios x, magnetização, entre outras.

A solução de alguns dos problemas abordados só foi possível graças à utilização da infra-estrutura e das técnicas existentes no CBPF.

O Grupo de Meteoritos, Minerais e Ligas Metálicas mantém colaboração com a PUC do Rio de Janeiro, o Museu Nacional (Universidade Federal do Rio de Janeiro), o Instituto Militar de Engenharia e com várias instituições internacionais.



Izabel de Souza Azevedo (esq.) e Rosa Bernstein Scorzelli

# A estrutura eletrônica da matéria

Os elétrons e os núcleos se acoplam para formar átomos, moléculas e sólidos que constituem a matéria no mundo que conhecemos. Descobrir como a estrutura microscópica da matéria se relaciona às suas propriedades é um desafio que exige o emprego de métodos teóricos complexos e sofisticados computadores.

**Entre 1923 e 1932,** ocorreu uma revolução na física. Foi principalmente nesse período que se desenvolveu a chamada teoria quântica, que lida com os fenômenos nas dimensões do diminuto universo das moléculas, dos átomos e suas subpartículas.

A teoria quântica se iniciou em 1900, quando o físico alemão Max Planck (1858-1947) propôs que, na natureza, a energia só pode ser gerada ou absorvida em pequenos pacotes, os quanta (plural de quantum), rompendo com uma tradição de séculos na qual a energia era tida como um fluxo contínuo.

A partir daí, a teoria quântica se desenvolveu de forma surpreendente, explicando fenômenos para os quais a então teoria existente, a mecânica clássica – excelente para descrever fenômenos do mundo macroscópico e astronômico –, mostrava-se inadequada ou insuficiente. Entre os problemas enfrentados sem sucesso pela mecânica newtoniana estavam a estabilidade do núcleo dos átomos, >>>

## COMPONENTE DE OSSOS E DENTES É UM DOS ALVOS DA PESQUISA

O Grupo de Estrutura Eletrônica do CBPF tem trabalhado na aplicação de cálculos de estrutura eletrônica para sistemas complexos. Apresentamos aqui, de forma resumida, quatro exemplos de nossas linhas de pesquisa.

Moléculas de grandes dimensões que contêm vários átomos de elementos de transição podem se comportar como magnetos (ímãs) microscópicos. Esses sistemas apresentam interesse tecnológico pela possibilidade de funcionarem como dispositivos de armazenamento de dados microscópicos. Além

disso, por suas dimensões, podem apresentar efeitos magnéticos estranhos – duas dessas moléculas estão representadas nas figura 1.

Alguns materiais se estruturam pela superposição de camadas de átomos do mesmo tipo. Nosso grupo estudou o composto  $\text{EuCo}_2\text{P}_2$ , sólido formado por átomos dos elementos químicos európio (Eu), cobalto (Co) e fósforo (P), como mostra a figura 2. Como os átomos de Eu são muito pesados, foi necessário usar a extensão relativística da teoria de Schrödinger (teoria de Dirac).

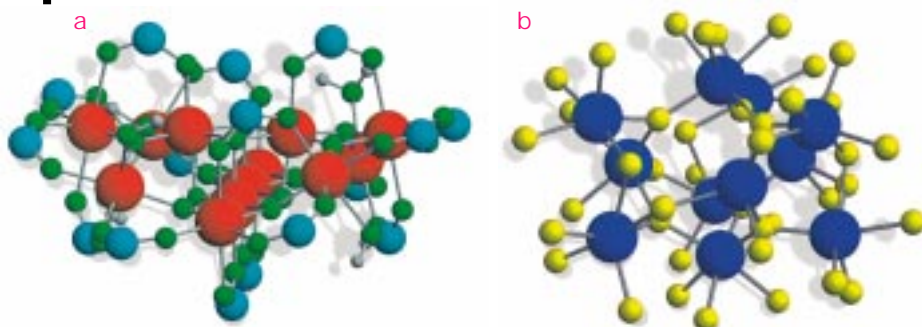


Figura 1. Em a, representação de uma molécula de grandes dimensões (nanoscópica) contendo 12 átomos de manganês (esferas vermelhas). As esferas menores são átomos de carbono (azuis) e oxigênio (verdes) – os átomos de hidrogênio não estão representados. Em b, molécula nanoscópica contendo 11 átomos de ferro (esferas azuis). As esferas menores são átomos de oxigênio – os átomos de hidrogênio não estão representados. Vislumbra-se que moléculas nanoscópicas possam funcionar como dispositivos de armazenamento de dados microscópicos, daí seu grande interesse tecnológico.



Diana Guenzburger (esq.) e Joice Terra

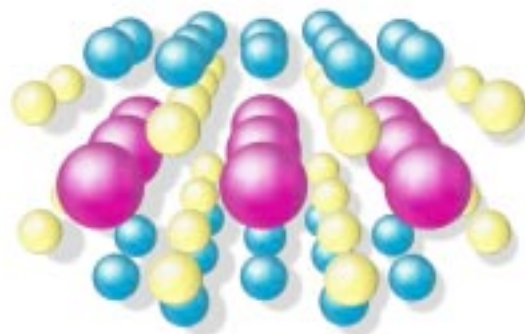


Figura 2. Aglomerado representando a molécula  $\text{EuCo}_2\text{P}_2$ , evidenciando a estrutura em camadas. As esferas maiores (rosa) representam os átomos de európio. Os átomos de cobalto e fósforo estão representados respectivamente pelas esferas azuis e amarelas.

Annite é um silicato do grupo da mica, conhecida por ser usada, por exemplo, no interior de ferros de passar roupa, como isolantes elétricos. Devido ao tipo peculiar da estrutura cristalina da mica, materiais pertencentes a este grupo têm sido usados na descontaminação do meio ambiente do lixo nuclear – principalmente do elemento radioativo célio. A figura 3 mostra a mica annite estudada por nosso grupo.

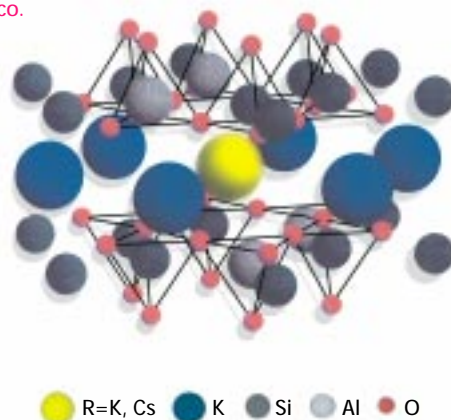


Figura 3. Aglomerado representando a estrutura da annite. São vistos os átomos de potássio (esferas azuis), silício (pretas), alumínio (cinzas) e oxigênio (vermelhas). A esfera central (amarela), geralmente ocupada por um átomo de potássio, pode dar lugar a um do elemento radioativo célio, o que faz a annite ter aplicações na descontaminação de lixo nuclear do meio ambiente.

A hidroxiapatita, mais conhecida pela sigla HAP, é o principal componente mineral dos ossos e esmalte dentário (figura 4). Essa substância, formada por átomos de cálcio, fósforo, oxigênio e hidrogênio, como mostra a fórmula  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , tem sido intensivamente estudada e usada no reparo, na construção e na troca de partes doentes ou danificadas do corpo humano.

As propriedades físicas da HAP são fortemente influenciadas pela presença de impurezas, como átomos de flúor, cloro, ferro, cobalto, cobre, zinco, chumbo, bem como íons carbonatados. Há uma enormidade de estudos, usando várias técnicas, para entender o papel dessas impurezas na solubilidade e no processo de desmineralização da hidroxiapatita. A investigação da estrutura eletrônica é fundamental para entender a relação entre os aspectos estruturais e as propriedades da HAP contaminada.

## EQUAÇÃO É FUNDAMENTAL NO UNIVERSO QUÂNTICO

A equação de Schrödinger é uma equação fundamental da teoria quântica, mais especificamente da chamada mecânica quântica, um desdobramento que nasceu na década de 1920.

Para o universo de dimensões atômicas e moleculares, a equação de Schrödinger é um equivalente das leis de movimento da mecânica clássica, introduzidas pelo físico inglês Isaac Newton (1642-1727), e das equações do eletromagnetismo (equações de Maxwell), propostas pelo físico escocês James Maxwell (1831-1879).

De modo simplificado, pode-se dizer que a equação de Schrödinger fornece a energia de um sistema, este podendo ser um átomo ou uma molécula. Resolvida essa equação, todas as propriedades do sistema estudado podem ser obtidas. Quando esse sistema é muito complexo – por exemplo, formado por vários núcleos e elétrons –, os físicos têm que utilizar outras ferramentas matemáticas para aproximar ou simplificar o problema.

as propriedades corpusculares e ondulatórias da matéria e o espectro de luz emitido pelos átomos quando excitados por radiação.

**TRATANDO O PROBLEMA.** Principalmente na década de 1920, a teoria quântica obteve enorme sucesso teórico e experimental. Sendo assim, logo nos primeiros anos da década seguinte, alguns cientistas mais apressados acreditavam que todos os problemas da química, da metalurgia, da cristalografia, bem como os relacionados à biofísica, à bioquímica e ao estudo da vida, estavam essencialmente resolvidos.

Visto de hoje, esse otimismo é compreensível, pois o instrumental matemático e conceitual da teoria quântica se mostrava poderoso. Particularmente, havia a chamada equação de Schrödinger, publicada em 1926 pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), prêmio Nobel de física de 1933. Sua equação possibilita calcular várias propriedades dos átomos (ver 'Equação é fundamental no universo quântico').

No entanto, na prática, a solução da equação de Schrödinger para um sistema de vários núcleos e elétrons – como é o caso de átomos, moléculas e materiais – é extremamente complicada. Isso só foi possível para sistemas mais complexos com o desenvolvimento de métodos que envolviam aproximações, as quais tornavam o problema tratável.

**MOLÉCULAS E SÓLIDOS.** Esses métodos de aproximação envolvem cálculos numéricos também extremamente complexos e só puderam ser formulados e aplicados com o uso de máquinas de calcular a partir da década de 1930 e com o aparecimento dos primeiros computadores na década de 1950.

&gt;&gt;&gt;

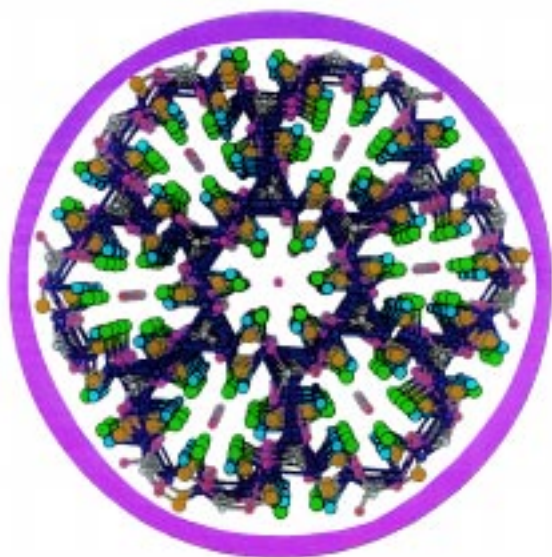


Figura 4. Visão superior de um conjunto de 1.800 átomos da hidroxiapatita, principal componente mineral dos ossos e esmalte dentário. As esferas verdes e cinzas são átomos de cálcio. As esferas laranjas são os átomos de fósforo. Todas as outras esferas representam os átomos de oxigênio e hidrogênio.

Antes do advento dos computadores, só sistemas muito simples, como pequenas moléculas – por exemplo, hidrogênio ( $H_2$ ), gás carbônico (CO), óxido de nitrogênio (NO) –, podiam ser estudados pela teoria quântica. E mesmo estes precisavam de uma simplificação.

Depois da década de 1950, graças ao aparecimento de uma nova teoria – conhecida por funcional da densidade (ou densidade local) – conferiu-se maior rapidez aos cálculos, permitindo assim a investigação de moléculas grandes e sólidos mais complexos.

**SINERGISMO TOTAL.** Em um sólido, as distâncias típicas entre os átomos são de cerca  $2 \times 10^{-8}$  cm. Some-se a isso o fato de alguns gramas de qualquer sólido conterem cerca de  $10^{23}$  átomos, ou seja, o número 1 seguido de 23 zeros! Sendo assim, seria impossível resolver a equação de Schrödinger para um sistema tão grande, caso não tivéssemos a ajuda do teorema de Bloch. Este teorema demonstrou que a simetria de translação do sólido se reflete na função de onda  $\psi$  do cristal. Os métodos baseados neste teorema são conhecidos como ‘cálculos de bandas’.

O campo de pesquisa científica que envolve a aplicação de todos os métodos de resolução aproximada da equação de Schrödinger para átomos, moléculas e sólidos é conhecido como estrutura eletrônica. Há um sinergismo total entre a evolução dessa área da ciência e o desenvolvimento dos computadores, já que estes são a ferramenta fundamental para os cálculos.

**IMPUREZAS E AGLOMERADOS.** Nos sólidos cristalinos, os átomos estão arranjados de forma periódica, de tal modo que há uma simetria de translação. Em outras palavras, podemos determinar a posição de cada átomo nesse tipo de sólido simplesmente deslocando, em todas as direções, um pequeno número deles – a chamada célula unitária.

Em muitos casos, a simetria translacional do cristal é quebrada localmente devido à existência de impurezas, vacâncias (‘vazios’) ou distorções na posição dos átomos. Outros sólidos não têm essa periodicidade e são chamados ‘amorfo’ – um exemplo de sólido amorfo é o vidro.

Pode-se estudar também apenas as propriedades localizadas em um determinado átomo. Nesses casos, resolve-se a equação de Schrödinger para um conjunto de átomos, chamado ‘aglomerado’ (*cluster*, em inglês), escolhidos para representar o sistema, sendo que a simulação da parte externa ao aglomerado no sólido é feita de forma aproximada.

Ao longo de seu desenvolvimento, a área de estrutura eletrônica, através do uso de técnicas experimentais e ferramentas teóricas, vem contribuindo para o descobrimento de novos materiais cujas aplicações vão da medicina e eletrônica à indústria aeroespacial e informática. ■

MARCUS ALMEIDA/ICONE



**Tanto o entendimento da radioatividade quanto o sucesso na síntese de novos elementos químicos contaram com a ajuda de poderosa ferramenta teórica de um dos mecanismos mais intrigantes da mecânica quântica: o efeito túnel.**

A geração de energia elétrica em usinas nucleares, como as de Angra I e Angra II (acima), no sul do estado do Rio de Janeiro, é uma das alternativas vantajosas de suprimento de energia para um país como o Brasil, que detém reservas de urânio (o combustível dessas usinas) superiores a 300 mil toneladas. A radioatividade do urânio e dos radioelementos que o sucedem em uma espécie de cadeia radioativa natural é, por excelência, a propriedade nuclear de que se utiliza o técnico de campo na identificação e caracterização de ocorrências de urânio que possam se mostrar técnica e economicamente viáveis.

# Efeito túnel e estabilidade nuclear

**Desde o início do século 20**, as transformações de um núcleo atômico em outro, fenômeno conhecido por radioatividade, têm sido objeto de importantes investigações teóricas e experimentais, bem como das mais diversas aplicações por físicos e químicos em todo o mundo. Por outro lado, a produção de novos elementos químicos além dos que ocorrem na natureza vem sendo também perseguida desde a década de 1940 e, mais recentemente, intensificaram-se os trabalhos em direção à produção de elementos superpesados.

Certas variedades de núcleos atômicos presentes na natureza – por exemplo, de urânio, tório, rádio e samário – são conhecidas por se desintegrarem espontaneamente, emitindo pequenas partículas nucleares que, em 1909, foram identificadas como sendo núcleos de átomos do gás hélio pelos físicos e químicos ingleses *sir* Ernest Rutherford (1871-1937) e Thomas Royds (1884-1955).

Essas partículas são conhecidas desde 1898 como ‘partículas alfa’. Vale acrescentar que, naquele mesmo ano, a transmutação nuclear (transformação de um núcleo em outro) recebeu o nome de ‘radioatividade’, dado pela física e química polonesa Marie Curie (1867-1934).

**DESINTEGRAÇÃO ALFA.** Urânio, tório, alguns de seus descendentes nas chamadas cadeias radioativas naturais (rádio, radônio e polônio, por exemplo) e alguns elementos das terras raras (neodímio, samário e gadolínio) possuem a propriedade de emitirem partículas alfa.

A grande maioria das espécies nucleares, no entanto, não exhibe o fenômeno da radioatividade alfa, ainda que o balanço de massa-energia favoreça sua ocorrência (ver ‘Balanço de massa-energia favorece emissão’). Esses núcleos são ditos estáveis com relação

à desintegração alfa – as variedades nucleares do chumbo, mercúrio, tungstênio e o ouro presentes na natureza são alguns poucos exemplos.

Foi somente na década de 1920, com o advento da mecânica quântica, que a radioatividade alfa pôde ser compreendida, a partir dos trabalhos pioneiros – e independentes – publicados em 1928 pelo físico russo George Gamow (1904-1968), bem como pelo físico norte-americano Edward Condon (1902-1974), juntamente com o físico inglês Ronald Gurney (1898-1953). Mais especificamente, foi através de um mecanismo quântico conhecido por efeito túnel que se ampliou a compreensão sobre esse fenômeno (ver ‘Barreira é transposta mesmo sem energia suficiente’).

**FISSÃO ESPONTÂNEA.** Duas décadas mais tarde, físicos nucleares experimentais em diferentes laboratórios no mundo passaram a observar o fenômeno conhecido por fissão espontânea, no qual o núcleo se divide em dois fragmentos de massas comparáveis. O urânio 238, bem como elementos mais pesados (transurânicos), são os melhores exemplos de núcleos que exibem esse fenômeno.

## BALANÇO DE MASSA-ENERGIA FAVORECE EMISSÃO

O urânio 238 é um exemplo típico de elemento que se desintegra por emissão de partícula alfa. Seu núcleo é composto de 92 prótons ( $Z=92$ ) e 146 nêutrons ( $N=146$ ), sendo que a soma dessas partículas leva ao seu número de massa ( $A=Z+N=238$ ) – na notação científica, simplificamos essas informações através do símbolo  ${}_{92}^{238}\text{U}_{146}$ .

O núcleo de urânio 238 desintegra-se por emissão de uma partí-

cula alfa – ou núcleo de hélio ( ${}^4_2\text{He}$ ) –, dando como produto o núcleo do elemento químico tório ( ${}^{234}_{90}\text{Th}$ ). Diz-se, então, que o núcleo  ${}^{238}\text{U}$  é radioativo (ou instável) com respeito à emissão alfa.

A radioatividade do  ${}^{238}\text{U}$  é em parte possível porque a massa do  ${}^{238}\text{U}$  é maior do que a soma das massas do  ${}^{234}\text{Th}$  e da partícula alfa, ou ainda, o balanço de massa-energia é favorável a que ocorra a desintegração.

&gt;&gt;&gt;

## BARREIRA É TRANSPOSTA MESMO SEM ENERGIA SUFICIENTE

Para entender o efeito túnel, faremos aqui uma analogia. Suponhamos, como na figura 1a, que uma pequena esfera rola (sem deslizar) com velocidade uniforme sobre uma superfície horizontal na qual se encontra uma barreira a ser transposta pela esfera.

Sendo  $T$  a energia cinética na superfície (devida ao movimento) e  $P$  a energia potencial no topo da barreira (devida, no caso, à posição), o nosso entendimento 'clássico' do fenômeno nos diz que a transposição da esfera da região I para a região II só será possível quando  $T > P$ . Caso contrário, o movimento da esfera ficará restrito à região I.

Entretanto, esse não é o caso quando usamos as idéias da mecânica quântica para descrever o movimento das partículas subatômicas. Aqui, esse movimento é descrito por uma onda associada à partícula, que

obedece a certa equação de onda – a chamada equação de Schrödinger, proposta em 1926 pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961).

Com essa nova descrição, mostrou-se que há uma probabilidade  $p$  (pequena, é verdade, mas não nula) de

uma partícula transpor uma 'barreira de potencial' sem para isso ter energia cinética suficiente (figura 1b). Diz-se, nesse caso, que a partícula transpõe a barreira por efeito túnel (ou por tunelamento).

Ainda com base na figura 1b, o leitor com algum interesse em física e

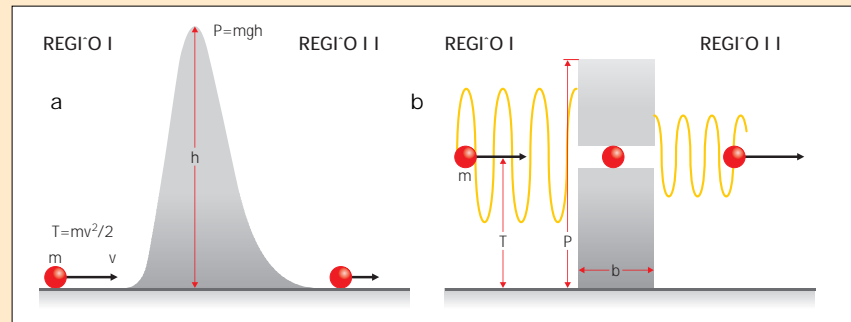


Figura 1. Em a, para vencer uma 'barreira de potencial' de altura  $h$  e chegar à região II, a energia cinética da esfera ( $T=mv^2/2$ ) deverá ser maior do que a energia potencial ( $P=mgh$ ) imposta pela barreira –  $m$  é a massa da esfera,  $v$  a velocidade e  $g$  a aceleração da gravidade. Em b, esquema mostra uma partícula subatômica de massa  $\approx 10^{-27}$  kg e energia cinética  $T \approx 10^{-12}$  joule atravessando uma 'barreira de potencial' de energia  $P>T$  e largura  $b \approx 10^{-14}$  m. Esse fenômeno, denominado efeito túnel (ou tunelamento) ocorre porque no mundo subatômico sempre há uma probabilidade (pequena, porém não nula) de que a partícula vença a barreira.

FIGURAS CEDIDAS PELO AUTOR

Normalmente, parte da energia total disponível para a fissão é gasta como energia de excitação dos próprios fragmentos. A fissão espontânea tem sido também descrita mediante o efeito túnel, em que a barreira de potencial a ser transposta tem, agora, uma forte componente nuclear atrativa, devido à força forte que age no núcleo para mantê-lo coeso, competindo com a componente repulsiva, relativa às cargas elétricas positivas dos fragmentos.

## MODELO COMPARA NÚCLEO A GOTA LÍQUIDA

Por mais de 35 anos, Grupos de Física Nuclear que se sucederam no CBPF têm se ocupado de temas relacionados à estabilidade nuclear, os quais podem ser estudados pelo mecanismo quântico conhecido por efeito túnel.

O atual Grupo de Física Nuclear desenvolveu o modelo ELDM (sigla, em inglês, para Modelo Efetivo de Gota Líquida), que é capaz de descrever de uma maneira unificada as diferentes formas de radioatividade mencionadas

neste artigo, inclusive fornecendo previsões sobre a instabilidade nuclear e, portanto, sobre a existência – ainda que efêmera – de núcleos superpesados de  $Z > 112$ .

Finalmente, o efeito túnel tem sido também aplicado na identificação dos pares de fragmentos mais favoráveis para produção de elementos superpesados em reações nucleares de fusão fria, o processo inverso das desintegrações radioativas exóticas.

No entanto, há casos – e modos – de fissão nuclear em que os fragmentos são produzidos praticamente sem energia de excitação. Trata-se aqui da assim chamada 'fissão fria' (figura 3a), que vem sendo investigada durante os últimos dez anos, tanto do ponto de vista experimental quanto teórico.

**RADIOATIVIDADE EXÓTICA.** Em 1975, um grupo de físicos nucleares brasileiros, trabalhando no CBPF, anunciou a possibilidade de que núcleos atômicos pesados viessem a se desintegrar espontaneamente, emitindo fragmentos nucleares maiores do que a partícula alfa, porém bem menores do que os fragmentos da fissão ordinária – os trabalhos foram publicados nos *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (vol. 47 n.3/4, p.567, 1975 e vol. 48, n.2, p. 205, 1976).

A verificação experimental dessa possível nova forma de radioatividade natural foi apresentada nove anos mais tarde por dois físicos ingleses da Universidade de Oxford, quando identificaram a emissão de carbono 14 pelo rádio 223 – o leitor interessado poderá obter mais informações sobre a com-

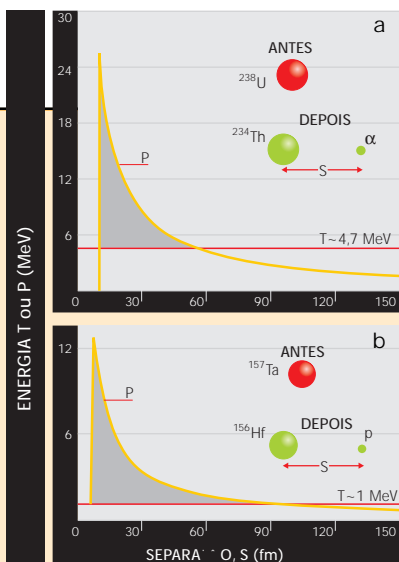


Figura 2. Em a, barreira de potencial para a desintegração do urânio 238 em tório 234 mais uma partícula alfa. A probabilidade de tunelamento é muito pequena ( $p \approx 10^{-39}$ ). Em b, a probabilidade de tunelamento para o tântalo 157 decair em háfnio 156 emitindo um próton é bem maior que no caso anterior ( $p \approx 10^{-21}$ ). As unidades para as grandezas dos eixos vertical e horizontal são, respectivamente, milhões de elétron-volt ( $1\text{MeV}=1,6 \times 10^{-13}$  joule) e milionésimos de bilionésimo de metro (ou  $1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$ ).

um conhecimento básico de matemática poderá se aventurar ao cálculo da probabilidade ( $p$ ) de uma partícula vencer a barreira de potencial. Isso é feito pela fórmula  $p \approx 10^{-G}$ , onde  $G=7,7b\sqrt{m(P-T)}/h$ , sendo  $h=6,6 \times 10^{-34}$  joule.s, também chamada constante de Planck, em homenagem ao físico alemão Max Planck (1858-1947).

Na radioatividade alfa e na desintegração por emissão de próton – esta última observada em um pequeno número de núcleos ricos em prótons –, a barreira de potencial a ser transposta é essencialmente criada pela repulsão eletrostática entre a carga positiva da partícula alfa (+2), ou a do próton (+1), e a carga positiva do núcleo residual, respectivamente, Z-2 (figura 2a) ou Z-1 (figura 2b).

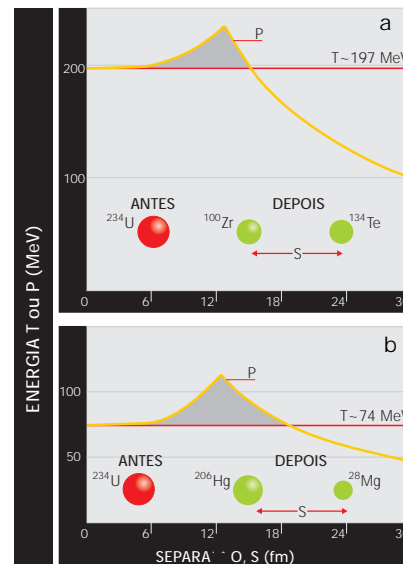


Figura 3. Em a, processo semelhante ao descrito na figura 2, porém agora para a fissão fria do urânio 234 produzindo zircônio 100 e telúrio 134. Em b, a desintegração exótica do urânio 234 em mercúrio 206 e magnésio 28. Em ambos os exemplos, a probabilidade de tunelamento é mínima, porém não nula ( $p \approx 10^{-47}$ ). As unidades para as grandezas dos eixos vertical e horizontal são como na figura 2.

provação do fenômeno na revista científica inglesa *Nature* (vol. 307, n.19, p.207 e 245, 1984), bem como na revista de divulgação científica *Ciência Hoje* (vol. 3, n. 14, p. 18, 1984)).

Hoje, são conhecidos 18 casos da chamada ‘radioatividade exótica’, em que fragmentos de carbono 14, oxigênio 20, neônio 24, magnésio 28 e silício 34 podem ser emitidos de núcleos mais pesados que o chumbo ( $Z=82$ ). O efeito túnel novamente aqui se aplica (figura 3b) para avaliar quantitativamente as taxas de desintegração e, conseqüentemente, prever possíveis novos casos de radioatividade (ver ‘Modelo compara núcleo a gota líquida’).

Recentemente, físicos e químicos nucleares tanto norteamericanos quanto russos relataram evidências experimentais da produção de elementos superpesados com número atômico acima de 112 ( $Z>112$ ) (figura 4). Esse resultado foi possível graças, em parte, a previsões teóricas feitas com base no efeito túnel, as quais indicaram não só a via de produção, isto é, os pares de fragmentos mais favoráveis para obtenção de elementos superpesados em reações nucleares de fusão fria, como também o período de sobrevivência desses novos elementos. ■

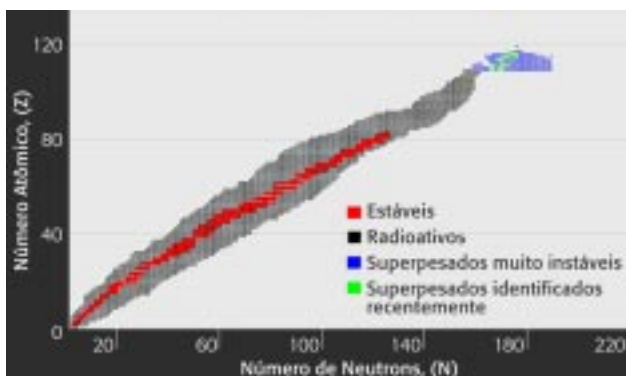


Figura 4. Mapa de núcleos atômicos. Um par de números – no caso, Z e N – define a localização de um núcleo no mapa.



Da esq. para dir.: Alejandro Dimarco, Odilon A. P. Tavares e Sérgio J. B. Duarte.

#### GRUPO DE COMPUTAÇÃO E REDES

Márcio Portes de Albuquerque (doutor)

Nilton Alves Jr. (mestre)

Ismar Thomaz Jabur (engenheiro)

Ricardo Baia Leite (mestre)

Marita Maestrelli Leobons (analista de sistemas)

Marcelo Portes de Albuquerque (doutor)

Bruno Richard Schulze (doutor)

#### COLABORADORES

Aline da Rocha Gesualdi (mestre)

Jaime Paixão Fernandes Jr.

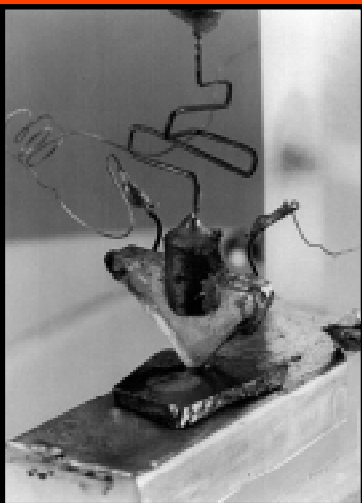
Sandro Luiz Pereira Silva

Denise Coutinho Alcântara Costa

Fernanda Santoro Jannuzzi

# Computação aliada à ciência

BELL LABS



O primeiro transistor, feito à base do elemento químico germânio, foi inventado em dezembro de 1947 nos laboratórios da companhia americana Bell Labs.

**A cooperação entre física e computação tem seu marco no final da década de 40, quando, nos laboratórios da empresa americana Bell Labs, foi inventado o transistor, dando início à era da microeletrônica. Nestas últimas cinco décadas, essa estreita colaboração tem gerado avanços significativos para ambas.**

**A física** utiliza a computação para a realização de simulações numéricas complexas, e a computação usa as descobertas científicas para construir dispositivos e computadores cada vez mais elaborados e eficientes.

Inúmeros projetos com aplicações tecnológicas nasceram ou tiveram importantes aplicações em laboratórios de física em todo o mundo. A popular *World Wide Web*, por exemplo, nasceu da necessidade de manipular e divulgar grandes volumes de dados no Cern, o laboratório de física europeu para pesquisas nucleares, com sede em Genebra (Suíça).

Aplicações em ambientes de computação paralela, na qual várias tarefas são realizadas simultaneamente pelo computador, tiveram grande avanço devido às simulações numéricas de colisões de partículas realizadas em laboratórios de pesquisa em física de altas energias, como o Fermilab (Estados Unidos).

No CBPF, o Grupo de Computação e Redes tem a preocupação constante em pôr em prática projetos tecnológicos que, além de corresponderem aos anseios dos pes-

quisadores, estejam na fronteira do conhecimento atual, como projetos na área de redes de computadores e processamento de imagens, que visam aliar a computação às novas descobertas científicas, bem como aqueles que utilizam tecnologias avançadas voltadas ao ensino e à divulgação da física moderna.

**ALTA VELOCIDADE.** Na área de redes de computadores, o CBPF participa do ambicioso projeto Rede Metropolitana de Alta Velocidade (Remav), juntamente com a Universidade Federal do Rio de Janeiro, o Instituto de Matemática Pura e Aplicada, a PUC Rio de Janeiro, a Fundação Oswaldo Cruz e a empresa de telecomunicações Telemar.

O Remav permite o desenvolvimento de técnicas nos moldes da Internet 2, a nova estrutura de comunicação em altíssimas velocidades que possibilita o desenvolvimento de projetos que integrem em alta qualidade vídeo, voz e dados. O Rio de Janeiro foi o primeiro estado brasileiro a disponibilizar

COORDENAÇÃO DE ATIVIDADES TÉCNICA (CBPF)

essa tecnologia aos grupos de pesquisas e à comunidade acadêmica em abril de 1999.

Mais precisamente, estamos preocupados em desenvolver protocolos (mecanismos para troca de mensagens entre dois sistemas de comunicação) que permitam utilizar e gerenciar eficientemente uma rede de alta velocidade, integrando serviços de necessidades específicas, como videoconferência aliada à colaboração e ao controle remoto de instrumentos de medidas.

Assim, mantemos colaboração constante, por meio de técnicas de videoconferência, com o laboratório Ravel (Redes de Alta Velocidade) da Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia (Coppe), da Universidade Federal do Rio de Janeiro, para estudar técnicas de transferência de vídeo e áudio em redes ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), técnica de comunicação que suporta elevadas taxas de transferência de dados com diferentes qualidade de serviço.

É também finalidade do projeto Remav integrar serviços de laboratórios de física na cidade do Rio de Janeiro. Um exemplo disso ocorre entre o laboratório de nanoscopia da



Figura 1. A figura mostra um laboratório virtual onde se pode realizar a experiência sobre o efeito Compton. Tecnologias de multimídia permitem posicionar o detector (caixinha preta à direita) em quatro posições distintas e observar a variação do chamado deslocamento Compton através de gráficos.

## ENGENHARIA OPERACIONAL DA REDE FICA POR CONTA DO CBPF

REDE RIO DE COMPUTADORES (FAPERJ)

O CBPF é também um importante ponto de presença da Rede Rio 2, da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Ciência do Estado do Rio de Janeiro. Abriga em suas instalações a Coordenação de Engenharia Operacional (CEO) dessa rede metropolitana.

O esquema da Rede Rio 2 pode ser visto na figura 2. O principal objetivo dessa rede é oferecer à comunidade acadêmica do Rio de Janeiro o acesso à Internet. Para isso, dispõe de um anel em fibra óptica interligando instituições em alta velocidade (155Mbps).

A Rede Rio oferece conexão à Internet a 70 instituições diretamente e mais de 50 indiretamente, estando ligada à Rede Nacional de Pesquisas a 100Mbps. Conta ainda com um enlace direto aos Estados Unidos de 26Mbps. Ela foi pioneira na criação de um *backbone* de alta velocidade no Brasil.

Os engenheiros da CEO gerenciam os diversos equipamentos dessa rede, implementando novas tecnologias de comunicação e garantindo a segurança da rede entre outras atividades.

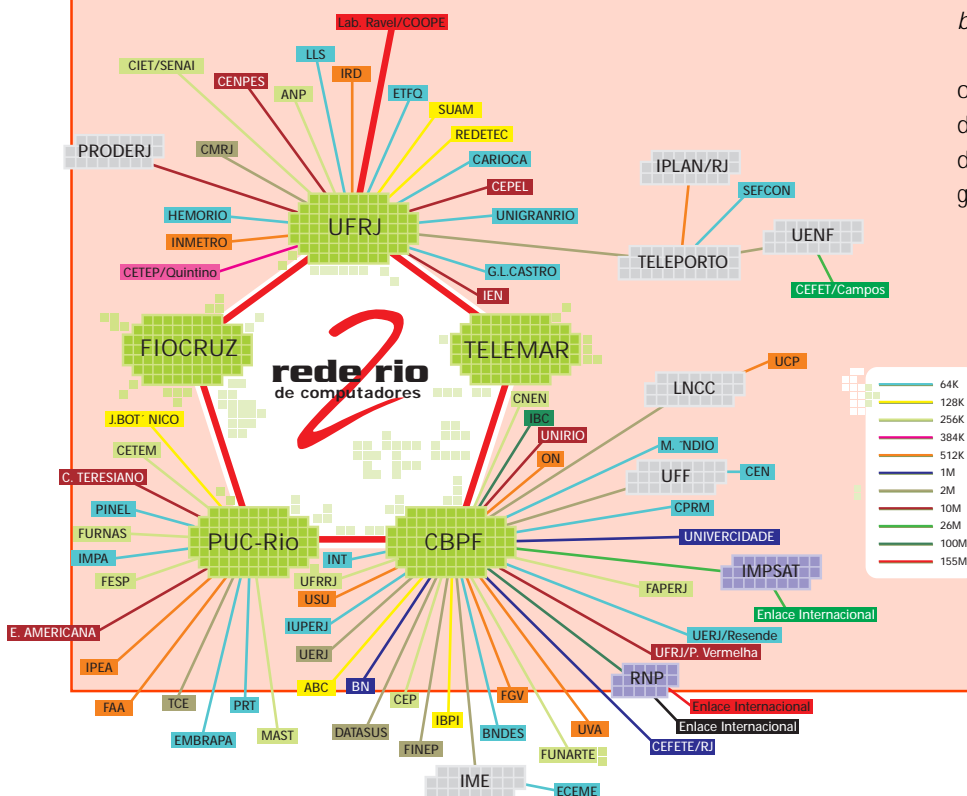


Figura 2. O CBPF é um importante ponto de presença da Rede Rio 2 e participa do projeto Rede Metropolitana de Alta Velocidade. Em função dessa estrutura moderna, grupos de pesquisas têm maior agilidade na troca de informação e estão interligando seus laboratórios. O CBPF mantém também a Coordenação de Engenharia Operacional, que é responsável pelo funcionamento da Rede Rio.

>>>



Sentados (esq. para dir.): Nilton Alves Jr. e Aline da Rocha Gesualdi; em pé (esq. para dir.): Marcelo Portes de Albuquerque, Ismar Thomaz Jabur e Márcio Portes de Albuquerque.

PUC Rio de Janeiro e o do Grupo de Nanoscopia do CBPF (ver nesta edição 'A microscopia do novo milênio').

Esses laboratórios permitirão uma maior agilidade na colaboração entre grupos de pesquisas, através de ferramentas computacionais como a videoconferência de alta qualidade e o compartilhamento remoto de dados. Esperamos que no próximo ano pesquisadores e alunos das duas instituições possam interagir e acompanhar experimentos realizados a distância.

**EXPERIMENTOS VIRTUAIS.** O projeto Física Moderna na Web, em colaboração com o Grupo de Pesquisa em Ensino de Física da PUC São Paulo, tem por objetivo desenvolver um portal web dedicado à chamada física moderna, que lida com fenômenos na dimensão dos átomos e suas subpartículas. O portal estará voltado a estudantes e professores de ensino médio, bem como acessível a qualquer pessoa interessada no assunto.

A idéia básica é usar tecnologias atuais de multimídia – como DHTML, Flash, imagens 3D, áudio, vídeo, streamer, Java, entre outras – para que o visitante veja algo mais do que uma simples reprodução digital de um livro. O portal deverá ter navegabilidade sutil, isto é, apresentará situações que não sejam óbvias – semelhantes, por exemplo, a um quebra-cabeça – como uma forma de estímulo que transcende os objetos relativos ao tema.

Além disso, a Física Moderna na Web abordará os principais conceitos e experimentos que caracterizaram a física no início do século 20, através de simulações, filmes, figuras, gráficos e tex-

tos. Outro aspecto importante é que alunos de graduação praticamente elaboraram todo o conteúdo, que foi posteriormente analisado por professores de ensino médio durante a Escola de Verão do CBPF. Várias mudanças foram sugeridas, bem como incrementos que ainda estão em fase de consolidação.

A figura 1 mostra, por exemplo, um laboratório virtual construído com base nas tecnologias avançadas de multimídia. Com essa aparelhagem virtual, pode-se realizar o experimento do efeito Compton, que foi crucial no início da década de 1920 para demonstrar que, na dimensão atômica, os objetos se comportam tanto como ondas quanto como partículas – o nome do efeito é uma homenagem ao físico americano Arthur Compton (1892-1962), que, por essa descoberta, ganhou o prêmio Nobel de física de 1927.

**ÁREA EM EXPANSÃO.** O Grupo de Computação e Redes está envolvido também na extração de resultados de medidas de experiências físicas através do processamento digital de imagens. Hoje, é muito comum comportamentos físicos descritos sob a forma de imagens. Alguns laboratórios de física experimental usam técnicas de análise de imagens para restaurar, segmentar, reconhecer ou interpretar resultados físicos.

A disciplina de processamento de imagens auxilia pesquisadores na análise de suas medidas, como, por exemplo, na contagem de grãos que formam a trajetória de partículas em chapas fotografias especiais (emulsões nucleares); na evolução das diminutas regiões (domínios) que formam um material magnético; no cálculo da distribuição do magnetismo dentro da estrutura atômica; na separação de isótopos; na forma como computadores, através das chamadas redes neuronais, reconhecem imagens e padrões, entre outras aplicações.

O processamento de imagens é, certamente, uma área em expansão nos laboratórios de física experimental. Sua interdisciplinaridade faz com que o Grupo de Computação e Redes participe ativamente do mestrado de instrumentação do CBPF, que tem como objetivo formar físicos e engenheiros especializados.

O grupo mantém também colaboração com universidades e iniciativa privada, desenvolvendo projetos e proporcionando a pequenas e microempresas suporte qualificado para a transferência de tecnologias de competência do CBPF. Assim, o Grupo de Computação e Redes vem favorecendo o desenvolvimento tecnológico de empresas engajadas em pesquisa, bem como daquelas que desejam interagir com a comunidade científica e acadêmica do Rio de Janeiro. ■

#### MAIS INFORMAÇÕES:

COORDENAÇÃO DE ATIVIDADES TÉCNICAS  
<http://www.cbpf.br/cat>  
 REDE METROPOLITANA DE ALTA VELOCIDADE  
<http://mesonpi.cat.cbpf.br/remav>  
 REDE RIO  
<http://www.rederio.br/>  
 FÍSICA MODERNA NA WEB  
<http://mesonpi.cat.cbpf.br/fismod>  
 FAPERJ  
<http://www.faperj.br>

# A microscopia do novo milênio

Desde o século 17, quando o microscópio óptico foi inventado, até meados do século 20, quando surgiram novos tipos desses equipamentos, era impossível a visualização de objetos de dimensões menores que alguns milésimos de milímetros. Porém, a invenção dos microscópios de varredura por sonda abriu o caminho para a realização, em escala nanoscópica e tridimensional, de um velho sonho do cientista: a visualização de átomos e moléculas.



**No início da década de 1980**, o físico alemão Gerd Binnig e o físico suíço Heinrich Rohrer estudavam as forças que agiam entre elétrons da superfície de um metal e uma ponta metálica nos laboratórios da empresa IBM, em Zurique (Suíça). A pesquisa, inicialmente voltada ao estudo das interações da matéria, iria se transformar em um dos aparelhos mais fantásticos que existem atualmente: o microscópio de varredura, que, pouco depois, daria origem a uma grande família de equipamento semelhantes, todos usados para observar objetos em escala atômica.

Neste artigo, iremos nos deter a um dos mais versáteis integrantes dessa família: o microscópio de força atômica – mais conhecido pela sigla, em inglês, AFM. Seu princípio de funcionamento é muito simples, e sua melhor propriedade – >>>

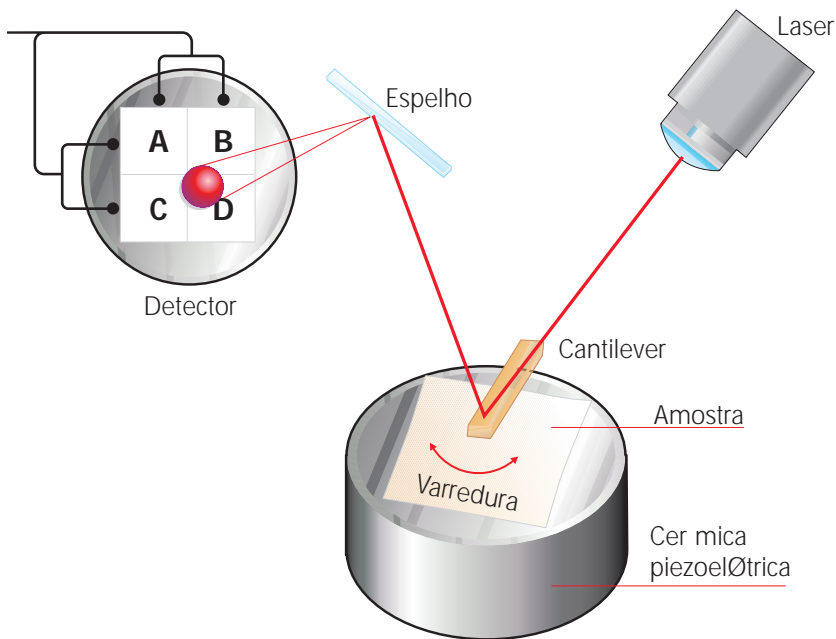


Figura 1. Esquema de um microscópio de força atômica. Enquanto o cantilever varre a amostra, apoiada sobre uma cerâmica, a luz do laser, que incide sobre ele, é refletida para um espelho que a leva até um detector, que mede as deflexões do braço e envia as informações para um computador, que as transforma em imagem.

não compartilhada com nenhum outro aparelho de observação nessa escala – é a visão dos objetos em três dimensões.

O AFM é composto basicamente por uma ponta (ou sonda) que varre a superfície da amostra em estudo. Assim, mede-se a força de interação entre os átomos da ponta e os da superfície, e os resultados são transformados em imagens da amostra, com a ajuda de recursos computacionais.

**ATRAÇÃO E REPULSÃO.** São várias as forças envolvidas nessa varredura, mas fundamentalmente resumem-se a dois tipos: as de atração e as de repulsão. As primeiras, chamadas forças de van der Waals, cuja origem é química, atuam a distâncias que variam de 100 nanômetros a algumas unidades dessa escala – um nanômetro equivale a um bilionésimo de metro, ou seja,  $10^{-9}$  metro. Já as forças repulsivas agem quando a ponta entra em contato com a superfície e têm sua origem no princípio de exclusão de Pauli, nome dado em homenagem ao físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958), Nobel de física de 1945 – em termos práticos, esse princípio impede que dois corpos ocupem o mesmo lugar no espaço.

Um esquema simplificado do microscópio AFM é mostrado na figura 1, onde vemos uma amostra – apoiada sobre uma cerâmica especial (piezoelétrica) que serve para posicioná-la –, cuja superfície é percorrida por uma ponteira suportada por um braço de apoio, chamado *cantilever*. Nesse braço, incide a luz de um laser, que se reflete na superfície do cantilever, vai para um espelho e finalmente alcança um fotodetector de quatro seções.

**REVESTIMENTOS E PELÍCULAS.** O fotodetector mede as deflexões do braço causadas pelas rugosidades da amostra quando ela é varrida pela ponteira. Os resultados dessas medidas são transferidos para um computador que, utilizando um *software* especificamente feito para isso,

transforma a informação em uma imagem da superfície. Um exemplo é mostrado na figura 2, onde temos a imagem de um filme de grafite obtida em nosso laboratório.

São inúmeras as aplicações que decorrem desse tipo de pesquisa. Investigar a superfície de uma amostra resulta no conhecimento de propriedades chamadas tribológicas, como rugosidade, dureza, rigidez, elasticidade, atrito, entre outras, que serão usadas na indústria, por exemplo, para obter revestimentos de alto impacto, películas protetoras, etc.

**BACTÉRIAS MAGNÉTICAS.** Mas a utilidade de um AFM não pára por aí. Com pequenas modificações introduzidas no microscópio de força atômica, é possível estudar cargas superficiais, domínios elétricos e magnéticos e muitas outras propriedades. Ou seja: é possível fazer pesquisa básica em materiais (ver também nesta edição 'O impacto dos materiais avançados'). Na figura 3, vemos uma imagem de uma bactéria magnética que tem cristais de

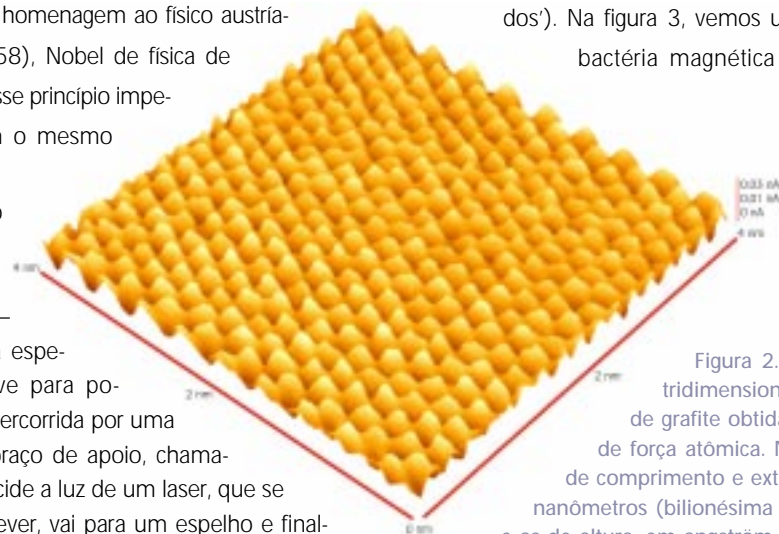


Figura 2. Imagem tridimensional de um filme de grafite obtida com microscópio de força atômica. Na figura, as medidas de comprimento e extensão estão em nanômetros (bilionésima parte do metro) e as de altura, em angström ( $1\text{\AA}$  equivale a um décimo de bilionésimo de metro).

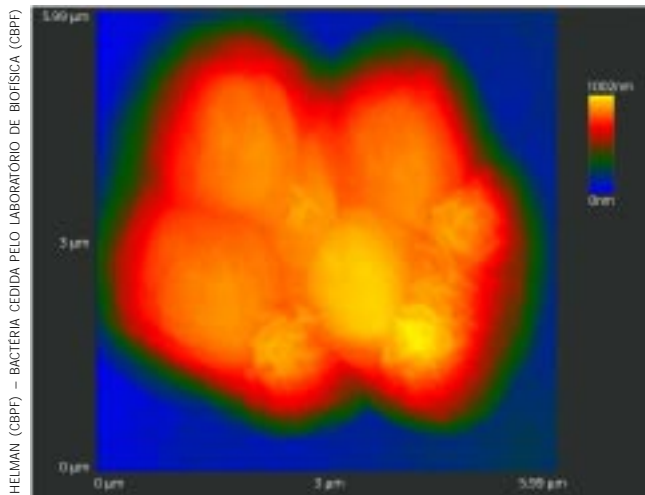


Figura 3. Imagem de bactéria magnética feita com microscopia de varredura. O microrganismo – no caso, multicelular – usa os ímãs (cristais de magnetita) em seu interior para orientar seu movimento segundo o campo magnético da Terra. As medidas estão em micrômetros ( $\mu\text{m}$ , milionésimo de metro) e em nanômetros (nm, bilionésimo de metro).

magnetita em seu interior, o que lhe permite se orientar e se movimentar segundo o campo magnético terrestre.

A grande família de microscópios de varredura, conhecida como SPM (sigla, em inglês, para microscópio de ponta de prova), é conhecida também como família de sonda de campo próximo, pois, em todas as suas variações, utiliza uma ponteira – para varrer a superfície a ser pesquisada – que permanece muito próxima ou em contato com a superfície. Isto permite a obtenção de imagens com resoluções que chegam, no plano da superfície, a um décimo de bilio-

nésimo de metro (ou  $1 \text{ \AA}$ ) e a  $10 \text{ \AA}$ , na direção perpendicular ao plano da amostra.

Com certeza, naquele início da década de 1980, Rohrer e Binnig não imaginavam que, ao investigar as forças entre superfícies e pontas afiadíssimas, estariam criando a microscopia do novo milênio, ao chegarem aos princípios básicos do STM, que se consagrou como o pai de toda uma família de novos microscópios. Em 1986, receberam o Nobel de física por sua invenção. ■

## EQUIPE CENTRA FORÇAS EM NOVO MICROSCÓPIO

O Laboratório de Nanoscopia Jorge S. Helman, do CBPF, possui um microscópio de força atômica, que, como já dissemos, permite a visualização dos objetos em três dimensões.

Com pequenas modificações introduzidas no AFM, é possível estudar, por exemplo, cargas superficiais, domínios elétricos e magnéticos, bem como fazer pesquisa básica em materiais. Outro tipo de modificação – a substituição da ponteira normalmente usada, de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), por uma de fibra óptica, construída em nosso laboratório – permite que esse equipamento seja também usado para estudar propriedades ópticas da amostra.

Através da fibra, passa-se um feixe de luz que incide sobre a superfície estudada. As ponteiros de fibra óptica são afinadas na extremidade, o que per-

mite que elas sejam usadas simultaneamente como sondas para varrer a superfície e como coletoras da luz para o estudo de centros de cor de uma amostra.

As vantagens desse tipo de equipamento são muitas. Pela forma com que opera, não produz danos na superfície, o que possibilita a repetição da experiência tantas vezes quantas forem necessárias. A preparação das amostras a serem estudadas é simples, bastando uma boa limpeza para que não haja problemas com a varredura.

Nos estudos feitos em nosso laboratório, não é necessário o uso de vácuo. É preciso apenas ar puro ou atmosfera de gás argônio, bem como pouca umidade e um local silencioso, para que vibrações espúrias não interfiram nas medidas realizadas.



Sentado: José Gomes Filho; em pé (esq. para dir.): Aníbal Omar Caride, Valéria B. Nunes e Susana I. Zanette

Inaugurado em 14 de abril de 1998, nosso laboratório ao longo destes anos tem se dedicado a várias linhas de pesquisa envolvendo microscopia de varredura. Atualmente, estamos desenvolvendo a construção de um outro integrante da família SPM: o microscópio óptico de varredura de campo próximo (SNOM), que é uma combinação de um SPM com um microscópio óptico convencional.

Mais informações sobre o Laboratório de Nanoscopia Jorge S. Helman no endereço [www.nanos.cbpf.br](http://www.nanos.cbpf.br), onde há apostilha atualizada e relação de trabalhos feitos.

# Caos e mecânica quântica

As áreas de caos e mecânica quântica nasceram há cerca de cem anos, mas permaneceram praticamente isoladas até a década de 1970. Hoje, o estudo quântico de sistemas não lineares, às vezes chamado caos quântico, já avança em direção às aplicações tecnológicas: é bem provável que dependam dessa teoria as propriedades dos futuros dispositivos eletrônicos.

**A descoberta** de que a maioria dos movimentos na mecânica clássica é extraordinariamente sensível ao estado inicial do sistema teve origem, há mais de um século, nos trabalhos sobre mecânica celeste do matemático francês Henri Poincaré (1854-1912).

Com o uso do computador, foi possível verificar a generalidade desse 'movimento caótico' para os mais variados sistemas. O exemplo citado com mais frequência é o do clima da Terra. Pequenas alterações na temperatura e pressão em uma certa região do planeta podem causar, por exemplo, nevascas, tormentas, furacões ou inundações em outras parte da Terra.

Esse foi um exemplo de comportamento caótico em um sistema físico de grandes dimensões. Entretanto, o caos também está presente em sistemas microscópicos, como grandes moléculas. A dinâmica, isto é, o modo como esses sistemas evoluem com o tempo, só pode ser descrita de modo aproximado pela mecânica clássica. Sua descrição correta exige a mecânica quântica, teoria que rege os fenômenos naturais nas dimensões moleculares, atômicas e subatômicas.

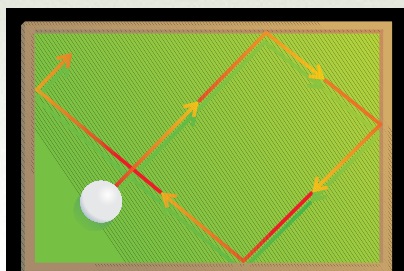


Figura 1. Um bilhar formado por uma só bola e mesa retangular sem caçapas não é caótico. Depois de quatro colisões com a borda, a trajetória da bola volta a ter a mesma direção.

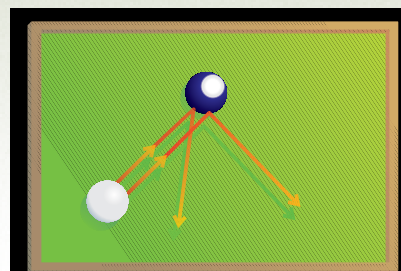


Figura 2. Fixando uma segunda bola à mesa, obtemos o chamado bilhar de Sinai. A segunda bola desfocaliza as trajetórias da primeira, gerando um movimento irregular ou caótico.

Surge assim uma pergunta intrigante: qual é o comportamento quântico de um sistema que seria caótico se tratado classicamente?

**BILHAR CAÓTICO.** Para se entender alguns dos problemas mais profundos da física, às vezes o melhor caminho passa por analogias divertidas. Um dos sistemas mecânicos mais simples a apresentar caos é o do jogo de bilhar.

O movimento de só uma bola em uma mesa retangular (sem caçapas) não é caótico. Como mostra a figura 1, o

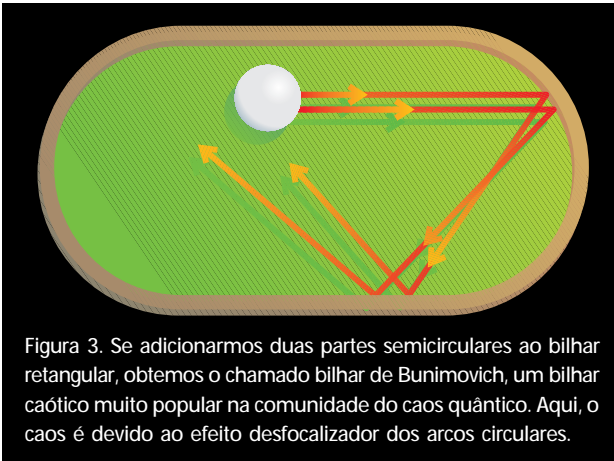


Figura 3. Se adicionarmos duas partes semicirculares ao bilhar retangular, obtemos o chamado bilhar de Bunimovich, um bilhar caótico muito popular na comunidade do caos quântico. Aqui, o caos é devido ao efeito desfocalizador dos arcos circulares.

movimento geral da bola neste caso terá sempre a mesma direção depois de quatro colisões com a borda da mesa. Uma pequena alteração na posição inicial da bola levará a um desvio de sua trajetória que cresce lentamente, enquanto duas trajetórias inicialmente paralelas permanecerão sempre paralelas.

Porém, a presença de uma segunda bola alterará fundamentalmente o movimento da primeira. Mesmo que simplifiquemos o jogo, prendendo uma bola no meio da mesa, como sugeriu o matemático russo Yacob Sinai, seu efeito será o de desfocalizar as trajetórias da outra bola, como mostra a figura 2. Podemos considerar que o papel da segunda bola é meramente o de alterar a forma do bilhar – que passou a ter uma borda interior, representada pelo contorno da bola extra.

Este é um exemplo particular de bilhar caótico. Em geral, um bilhar qualquer, mesmo com uma forma pouco irregular, será caótico. A figura 3 mostra o caso do chamado bilhar de Bunimovich, assim batizado em homenagem ao matemático russo Leonid Bunimovich. A desfocalização das trajetórias é a principal característica do caos na mecânica clássica.

**COMO UMA ONDA.** Quando falamos em focalizar, pensamos normalmente em raios de luz, antes de imaginar trajetórias. Em geral, na prática, estamos interessados na trajetória única de uma dada partícula, enquanto a luz que vemos é descrita como o efeito coletivo de muitos raios. A razão é que lidamos, de fato, com uma onda, da qual a óptica geométrica é apenas uma descrição aproximada.

O matemático irlandês William Hamilton (1805-1865) mostrou que podemos usar a mesma estrutura matemática para descrever tanto os raios da óptica geométrica quanto as trajetórias da mecânica clássica – por exemplo, os esguichos de uma fonte desenhando as trajetórias parabólicas das ‘partículas’ de água sujeitas à força da gravidade. A analogia entre óptica e mecânica permitiu que o físico francês Louis de Broglie (1892-1987) e o austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) criassem a chamada mecânica quântica ondulatória, que trata o átomo e suas subpartículas como fenômenos ondulatórios em vez de encará-los como corpúsculos.

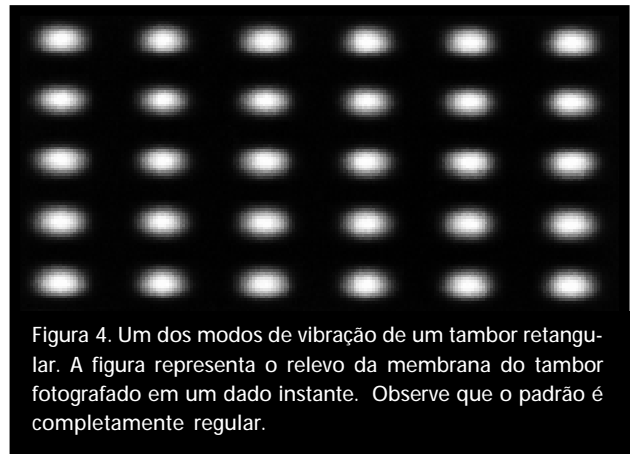


Figura 4. Um dos modos de vibração de um tambor retangular. A figura representa o relevo da membrana do tambor fotografado em um dado instante. Observe que o padrão é completamente regular.

## TRABALHO CONJUNTO SOLUCIONOU PROBLEMA

Será que é possível determinar a forma de um tambor unicamente através do espectro de frequência emitido por ele?

Um dos resultados mais importantes da teoria do caos quântico se refere às propriedades do espectro de frequência de um sistema classicamente caótico, como os bilhares das figuras 2 e 3 ou também os tambores com o mesmo formato das mesas.

Hoje, sabemos que a resposta à pergunta é negativa: existem bilhares de forma diferente com o mesmo espectro. Entretanto, aprendemos muito sobre as propriedades do espectro de bilhares caóticos.

Essas propriedades estão descritas pela conjectura de Bohigas, ou seja, uma hipótese considerada provavelmente verdadeira, mas ainda não demonstrada – o nome da conjectura é homenagem ao seu idealizador, o físico catalão

Oriol Bohigas. Ela mostra que no caso dos bilhares (ou tambores) caóticos é muito menos provável haver duas frequências de vibração quase iguais do que no caso de um sistema regular, como na figura 1.

A explicação desse resultado em termos das trajetórias clássicas foi fruto de trabalho, na década de 1980, de Michael Berry e John Hannay, na Inglaterra, e Alfredo Ozorio de Almeida, atualmente no CBPF.

>>>

**A FORMA DE UM TAMBOR.** O problema quântico correspondente ao jogo do bilhar clássico é o de saber quais ondas cabem nas formas das figuras 1, 2 ou 3. O melhor, então, é pensar nas vibrações de um tambor, cujo contorno tenha a mesma forma da mesa de bilhar. O som que ouviremos em cada caso poderá ser decomposto em movimentos ondulatórios da membrana do tambor, de frequências diferentes. Será que podemos 'ouvir a forma de um tambor'?

Esta é uma das questões iniciais no estudo do caos quântico, formulada pelo matemático norte-americano Marc Kac. Em outras palavras, sabemos que, para cada forma de nosso tambor, corresponde uma única seqüência (ou espectro) de frequências de vibração, uma vez dada a tensão da membrana.

Será que o conhecimento desse espectro de frequências determina univocamente a forma do tambor? De fato, não é necessariamente único o tambor com um dado espectro, mas esta é uma das propriedades fundamentais de um sistema quântico (ver 'Trabalho conjunto solucionou problema').

**BILHARISTAS E BATERISTAS.** Além de explicar propriedades mais definidas do espectro de frequência dos sistemas quânticos, os trabalhos em caos quântico procuram entender a estrutura de cada estado, ou seja, em nossa analogia isso corresponderia à estrutura do relevo da membrana do tambor fotografado em um dado instante, quando este vibra com uma única frequência.

Aqui, de novo, a forma da borda determina esse relevo, e a distinção principal está em o movimento do bilhar correspondente ser ou não caótico. Nas figuras 4 e 5, vemos exemplos de vibrações, respectivamente, regular e caótica.

Fora os jogadores de bilhar e os bateristas de escola de samba, quem mais poderia ter interesse no caos quântico?

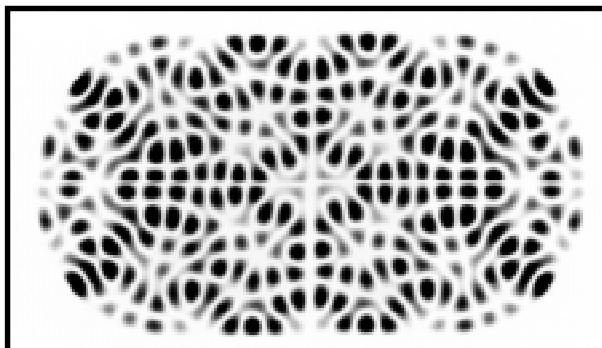


Figura 5. Um modo de vibração de um tambor com a forma do bilhar de Bunimovich. O relevo da membrana não apresenta regularidade alguma, exceto as simetrias

Entre muitas aplicações da teoria, destaca-se a tecnologia de nanoestruturas em semicondutores. Os 'pontos quânticos' minúsculos que a nanoengenharia produz para aprisionar um pequeno número de elétrons são o ponto de partida para futuras gerações de dispositivos eletrônicos. Suas formas podem ser alteradas exatamente como as dos tambores e dos bilhares que usamos como exemplo.

Os transistores atuais – de dimensões enormes se comparados com os pontos quânticos – podem ser considerados como sistemas clássicos. Em contraposição, as propriedades dos futuros dispositivos terão de ser entendidas dentro da teoria do caos quântico. ■



Raúl Oscar Vallejos (esq.) e Alfredo Miguel Ozorio de Almeida.

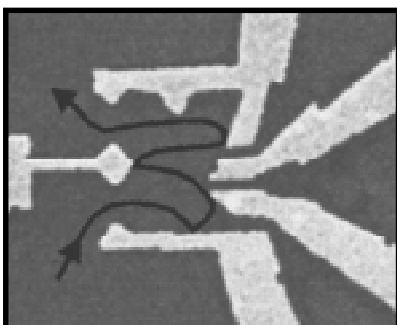


Figura 6. Microfotografia de um ponto quântico, isto é, um transistor de dimensões menores que um micrão (milionésimo de metro). As partes claras são os eletrodos, que definem as bordas deste 'bilhar' diminuto. A curva indica a trajetória hipotética de um elétron atravessando o transistor.

## CAOS QUÂNTICO.

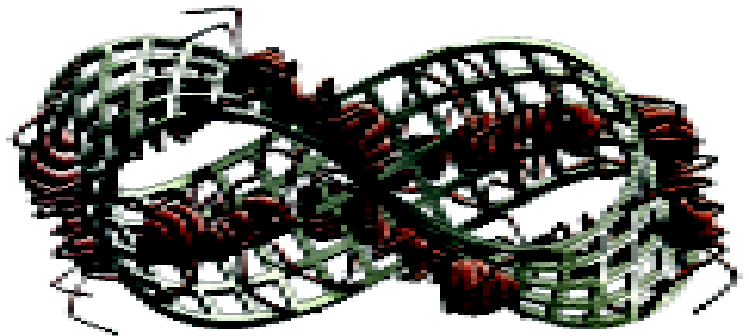
O Grupo de Caos Quântico do CBPF mantém e sedia o projeto 'Sistemas Hamiltonianos: Caos e Quantização', que é um dos projetos do Programa de Núcleos de Excelência (Pronex) e envolve pesquisadores da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, PUC Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Estadual de Campinas e Universidade Federal de Minas Gerais.

O objetivo do projeto, em linguagem mais técnica, é estudar o limite semiclassical de sistemas quânticos cujo limite clássico seja caótico. Os conhecimentos já estabelecidos sobre esses sistemas formam um instrumento poderoso para a compreensão de fenômenos em física atômica e nuclear e, mais recentemente, em física da matéria condensada.

# Biominaerais magnéticos

Você já observou as trilhas de formigas trazendo comida para o formigueiro? Já pensou como é que o pombo-correio se orienta para voltar ao lar quando está distante dezenas de quilômetros? Essas são apenas duas das várias questões intrigantes sobre o mecanismo de orientação magnética de seres vivos.

MOEBIUS BAND II. M. C. ESCHER (1963)



**Todo ser vivo de nosso planeta** interage com seu meio ambiente. Essa interação é um processo dinâmico que vai produzindo alterações mútuas e adaptando as espécies a seu meio, garantindo assim a sobrevivência delas.

O campo geomagnético faz parte do meio ambiente e está presente, de forma ininterrupta, na Terra desde antes do surgimento da vida, embora sua existência só tenha sido conhecida há quatro séculos. Variando no tempo e no espaço, sua intensidade é da ordem de 0,5 oersted (0,5 Oe), cerca de 20 vezes menos intenso que o campo magnético gerado por um ímã de geladeira – a unidade oersted é uma homenagem ao físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), descobridor da ação magnética de uma corrente elétrica.

Na região abrangendo Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e parte do oceano Atlântico, há uma grande anomalia >>>

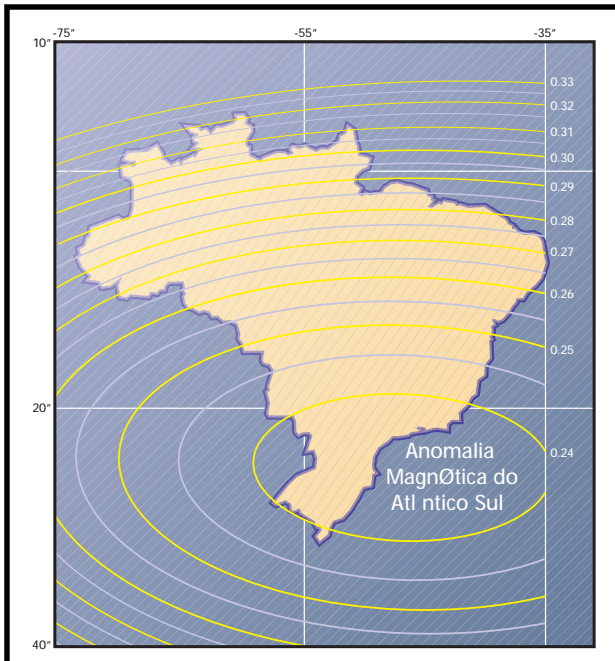


Figura 1. Gráfico mostra a variação da intensidade do campo magnético terrestre sobre o Brasil. A chamada Anomalia Magnética do Atlântico Sul, onde a intensidade do campo é mais fraca, abrange Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e parte do oceano Atlântico.

magnética, com campo da ordem de 0,2 oersted, a chamada Anomalia Magnética do Atlântico Sul (figura 1).

Estudos do efeito do campo geomagnético no comportamento dos seres vivos buscam compreender os mecanismos de percepção envolvidos, por exemplo, nos fenômenos de migração dos animais, de orientação no processo de busca de alimentos e na volta ao lar feita pelos pombos-correio. Embora esse efeito no comportamento seja hoje reconhecido, os diferentes mecanismos que cada espécie utiliza para perceber esse campo são ainda pouco compreendidos.

**BÚSSOLA VIVA.** Somente no caso de microrganismos magnéticos, a magnetotaxia, um mecanismo de resposta passiva, é bem compreendida do ponto de vista da física.

Em 1975, pela primeira vez, foram observadas pequenas partículas de um material magnético formando uma cadeia linear dentro do citoplasma de uma bactéria. A magnetita, um óxido de ferro biomineralizado e fortemente magnético, foi encontrado como constituinte dessas partículas.

A resposta passiva nesses microrganismos leva-os a se comportarem como uma 'bússola viva'. Desde então, vários estudos têm mostrado a presença de material magnético biomineralizado em outras espécies.

## PESQUISAS ABRANGEM DE BACTÉRIAS A INSETOS SOCIAIS

Há mais de 20 anos, o Grupo de Biofísica do CBPF estuda a diversidade de microrganismos magnéticos nas áreas tropicais da costa brasileira e seus cristais magnéticos, que são específicos para cada espécie (figura 2).

Nos últimos sete anos, estamos estudando também insetos sociais,

com o objetivo de detectar e identificar esses materiais e estudar suas propriedades magnéticas, lembrando que a abelha *Apis mellifera* é o inseto mais estudado com relação à orientação magnética.

Aos leitores interessados que queiram obter mais informações sobre o

assunto tratado neste artigo, sugerimos a leitura de 'Insetos Sociais: um exemplo de magnetismo animal', publicado na *Revista Brasileira de Ensino de Física* de setembro de 2000 (vol. 22 (3), 317-322), bem como 'Orientação magnética' (*Ciência Hoje* vol. 1, nº. 1, 1982, p.25).

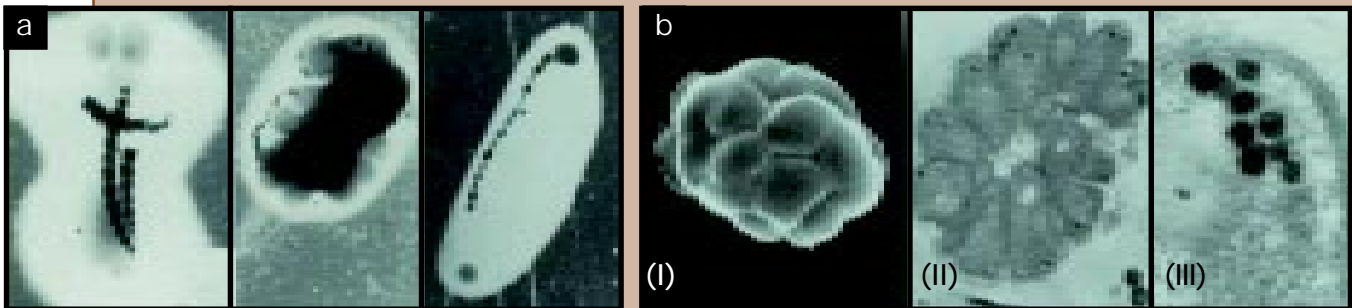


Figura 2. Em a, microscopia eletrônica de transmissão de diferentes bactérias magnéticas, mostrando cadeias de partículas de magnetita biomineralizadas em várias formas. Em b, microscopia eletrônica de varredura de um agregado multicelular (I) e microscopia de transmissão de um corte ultrafino desse agregado (II), mostrando partículas magnéticas nas células e uma ampliação dessas partículas magnéticas (III), que são de sulfeto férrico e não magnetita.



Figura 3. Formiga migratória *Pachycondyla marginata* carregando o único alimento vivo que ela caça, o cupim *Neocapritermes opacus*.

**ANIMAIS SUPERIORES.** Em animais superiores, a magnetorecepção não é um processo passivo de alinhamento das partículas ao campo magnético. Trata-se de um processo ativo, incluindo a detecção deste campo pelas partículas, originando um sinal, a transdução (transformação do sinal magnético em biológico) e sua amplificação pelo sistema nervoso, gerando uma resposta no comportamento.

Qualquer comportamento de um ser vivo é sempre altamente complexo e dependente do estímulo, sendo a orientação apenas um de seus componentes. Assim, a dificuldade de se compreender os mecanismos de orientação magnética analisando respostas de comportamento tem a ver com a limitada compreensão de outros mecanismos presentes, como o solar, o de polarização da luz, o quimiotático (sensibilidade de quimiorreceptores a substâncias do meio), entre outros.

No entanto, uma hipótese que vem se fortalecendo com os resultados da presença de material magnético biomineralizado em animais superiores é a de que esse material ferromagnético estaria organizado para detectar o campo geomagnético, apresentando propriedades magnéticas capazes de detectar variações da ordem de 0,0001 Oe, ou seja, campos cem mil vezes menores que o de um ímã de geladeira.

**FORMIGA DE FOGO.** Originalmente trabalhando com microrganismos magnéticos, passamos a estudar também insetos sociais, ou seja, aqueles que vivem em colônias, organizados em castas, exercendo funções diferentes. São exemplos as formigas, as abelhas, os cupins e as vespas. (ver 'Pesquisas abrangem de bactérias a insetos sociais').

Iniciamos, então, o estudo nas *Solenopsis*, popularmente conhecidas como 'lava-pés' ou 'formi-

ga de fogo'. Isso se deu com base nos seguintes argumentos: a) resultados que demonstravam o efeito do campo magnético sobre o comportamento da formiga *Solenopsis invicta* na busca de alimentos; b) a ampla distribuição dessa espécie; e c) a diversidade de formigas existentes no Brasil.

Obtivemos resultados indicando a presença de material magnético em várias de suas subespécies, coletadas de Fernando de Noronha ao Rio de Janeiro, incluindo Natal, Salvador e Venda Nova (Espírito Santo).

**ESPÉCIES MIGRATÓRIAS.** Se encontramos material magnético nas *Solenopsis*, por que não procurá-lo em formigas migratórias? E assim foi feito.

Coletamos *Pachycondyla marginata* uma formiga que, além de migratória, vive na região da anomalia magnética – mais especificamente, em Campinas (SP) – e só se alimenta de cupins vivos de uma única espécie, *Neocapritermes opacus* (figura 3).

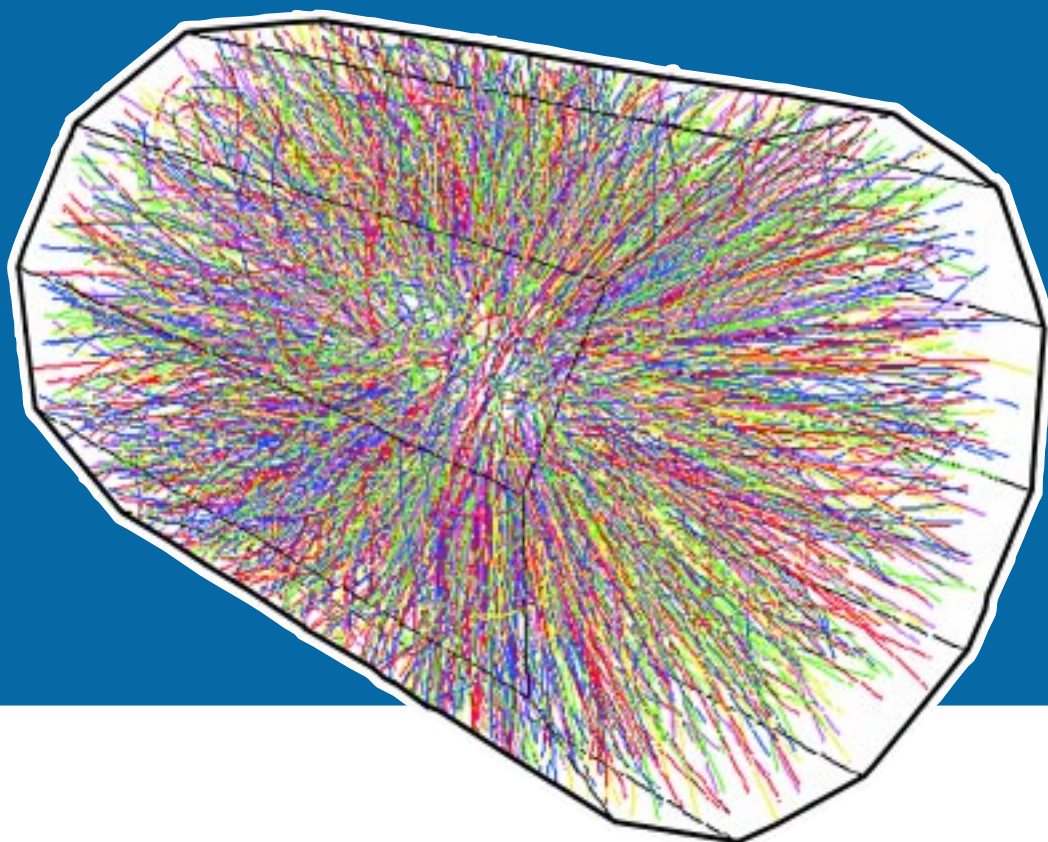
Usando basicamente as técnicas avançadas (microscopia eletrônica, ressonância ferromagnética e magnetometria de alta sensibilidade), pudemos detectar, identificar e estudar as propriedades magnéticas do material magnético dessas formigas migratórias.

Estamos obtendo resultados com essas mesmas técnicas em abelhas *Apis* e cupins *Neocapritermes* e buscando relacionar as propriedades do material magnético biomineralizado com suas respectivas organização, estrutura e função em cada inseto de nosso estudo. ■



Da esq. para dir.: Darci M. de Souza Esquivel, Eliane Wajnberg, Marcos André P. O. Guedes, Geraldo Cernicchiaro e Daniel A. Avalos.

# Íons pesados relativísticos



**Com o auxílio de uma poderosa ferramenta matemática e dos gigantescos aceleradores de partículas, os físicos estão desbravando o universo do núcleo atômico, revelando seu comportamento em condições extremas de temperatura e pressão, para entender mais sobre a matéria que forma das galáxias aos seres vivos.**

**O processo básico** para se entender o comportamento e as propriedades da matéria nuclear é fazer com que pequenas porções desta matéria, os íons pesados, entrem em processo de colisão. Esses experimentos são feitos em aceleradores de partículas – na atualidade, um dos principais para o caso de íons pesados é o Brookhaven National Laboratory (Estados Unidos).

Essas máquinas gigantescas funcionam como ‘pistas de corrida’ para partículas e núcleos, que, antes de se chocarem, são acelerados a velocidades próximas à da luz (300 mil km/s). Sendo assim, o tratamento teórico dessas colisões não pode prescindir do conhecimento da relatividade restrita (ou especial), publicada em 1905 pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955). Essa teoria possibilita calcular as variações (por exemplo, aumento de massa e dilatação do tempo) por que passa qualquer corpo maciço quando sua velocidade se aproxima dos 300 mil km/s. E isso vale também para corpúsculos como átomos, núcleos e partículas subatômicas. Daí, portanto, damos a denominação ‘relativísticos’ a esses fenômenos.

A figura 1 resume algumas etapas da colisão entre dois núcleos atômicos, processo que pode exigir uma descrição muito complexa para o seu entendimento. Nesse ponto, chamamos a atenção para o fato de os constituintes do núcleo atômico, os prótons e os nêutrons, serem compostos por partículas menores: os quarks e os glúons.

**DESCRIÇÃO LABORIOSA.** É a natureza da interação entre os glúons que possibilita, após a colisão, um novo rearranjo de quarks, bem como dos próprios glúons, para formar novas partículas, que aqui denominaremos hádrons – em uma definição mais técnica, hádrons são um grupo de partículas que

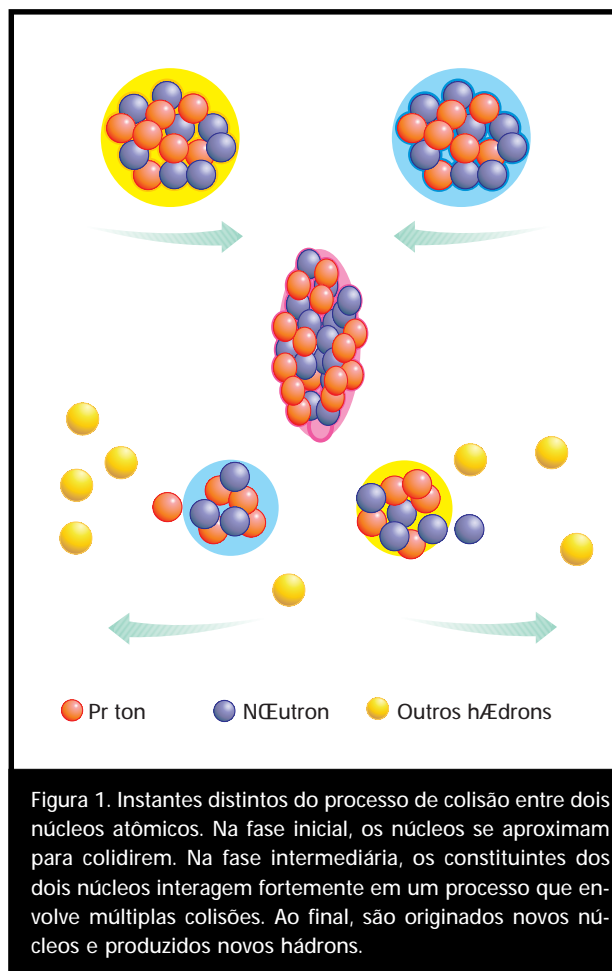


Figura 1. Instantes distintos do processo de colisão entre dois núcleos atômicos. Na fase inicial, os núcleos se aproximam para colidirem. Na fase intermediária, os constituintes dos dois núcleos interagem fortemente em um processo que envolve múltiplas colisões. Ao final, são originados novos núcleos e produzidos novos hádrons.

interagem entre si através da chamada força forte, responsável pela coesão do núcleo atômico.

Enfatizando: tudo isso pode nos levar a uma descrição laboriosa para a compreensão detalhada do fenômeno das colisões nucleares relativísticas. Assim, simular teoricamente esses choques é também tarefa complexa, pois nelas são por vezes criadas milhares de partículas, o que exige ferramentas matemáticas poderosas e um longo tempo de computação.

**CASCATA DE MINIRREAÇÕES.** Entretanto, para simplificar os cálculos, podemos ignorar os detalhes do processo de produção de partículas nas colisões entre hádrons – ou interações hádron-hádron, no jargão da

&gt;&gt;&gt;

## TÉCNICA USA SORTEIO PARA SIMULAR COLISÕES NUCLEARES

No CBPF, o Grupo de Física Nuclear e Astrofísica tem desenvolvido a simulação dos processos de colisão usando a técnica de cálculo conhecida como método de Monte Carlo, que se baseia no sorteio de eventos.

O método de Monte Carlo permite que, a partir do conhecimento dos mecanismos básicos de interação entre prótons e nêutrons (constituintes

do núcleo atômico), possamos descrever a colisão de hádrons com núcleos atômicos, bem como as colisões entre núcleos.

Atualmente, colaboram com o Grupo de Física Nuclear e Astrofísica pesquisadores do Instituto de Radioproteção e Dosimetria, do Conselho Nacional de Energia Nuclear, e do Instituto de Física da universidade de São Paulo.

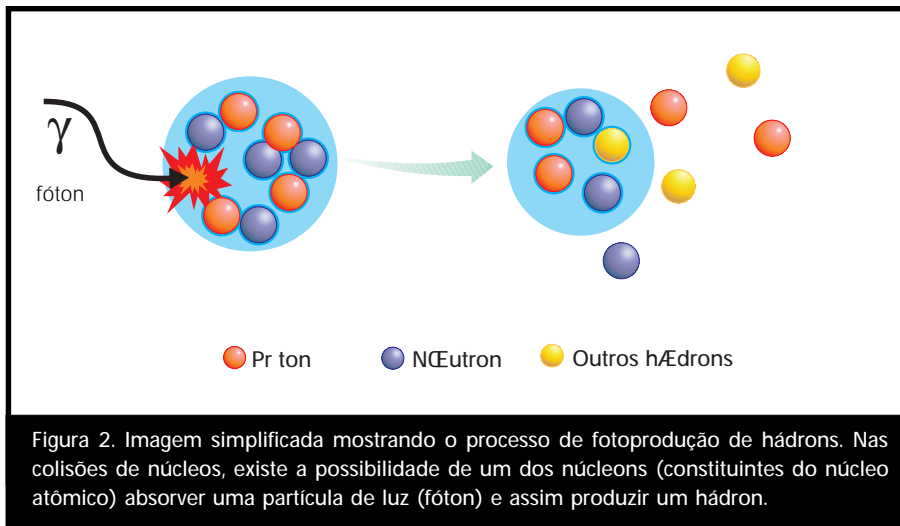
área – sem prejudicar a compreensão do fenômeno.

Consideramos esses efeitos através da inclusão dos valores experimentais – e, na falta destes, dos valores teóricos – das chamadas seções de choque de produção de hádrons – a seção de choque exprime a probabilidade de um grupo de partículas (no caso, hádrons) ser produzido durante uma colisão e seus valores dependem da energia envolvida na colisão.

Dai para frente, parece simples, mas não é. Na verdade, dezenas de processos diferentes estão envolvidos, com a possibilidade de múltiplas colisões: uma verdadeira cascata de minirreações que vão compor o quadro final. (ver 'Código foi desenvolvido pelo grupo').

**ABSORVENDO FÓTONS.** No meio nuclear, existe a possibilidade de um dos núcleons (constituintes nucleares) absorver uma radiação eletromagnética e com isso produzir um hádron, em um processo denominado fotoprodução de hádrons.

Para simular esse processo, o ponto de partida é o conhecimento de uma outra seção de choque (experimental ou teórica), isto é, daquela que dá a probabilidade de um partí-



cula do núcleo atômico absorver um fóton e gerar um hádron durante uma colisão.

O restante da evolução do processo de colisão é, então, desenvolvido da mesma forma que a considerada para a colisão núcleo-núcleo, e as quantidades físicas analisadas são semelhantes. A figura 2 apresenta uma imagem simplificada de como esse processo é considerado em nossos cálculos.

As simulações têm sido uma ferramenta hábil de cálculo para o estudo de fenômenos complexos que ocorrem em colisões nucleares relativísticas. Essas simulações têm também ajudado os físicos experimentais a entender e analisar os dados obtidos nos aceleradores de partículas. ■

## CÓDIGO FOI DESENVOLVIDO PELO GRUPO

O programa usado atualmente pelo CBPF foi desenvolvido pelo Grupo de Física Nuclear e Astrofísica. Ele contém cerca de 10 mil linhas de código Fortran (linguagem de programação usada em cálculos científicos).

Esse código realiza um cálculo (cascata intranuclear) adequado ao estudo das colisões relativísticas entre núcleos atômicos. Oferece também a possibilidade de explorar diferentes hipóteses na descrição do processo de interação hádron-hádron através das seções de choque, bem como na definição das forças que garantem a aglutinação dos hádrons em um núcleo.

Resultam desses cálculos a análise da multiplicidade e do espectro de energia das partículas produzidas, dos efeitos do meio nuclear no espalhamento das partículas, e da distribuição dos núcleos residuais.

Seguindo as mesmas idéias contidas no programa desenvolvido por nosso grupo para tratar das colisões núcleo-núcleo, chegamos a um outro código para tratar da fotoprodução de hádrons.



Sentados (esq. para dir.): Emil de Lima Medeiros e Sérgio Barbosa Duarte; em pé (esq. para dir.): Alejandro Di Marco e Edgar Corrêa de Oliveira.

# Os bárions charmosos

**Apesar de difíceis de produzir e complexos do ponto de vista teórico, os bárions charmosos são um excelente teste para os modelos atuais de partículas. Da análise de bilhões de colisões nos aceleradores de partículas, os físicos esperam em breve desvendar novas propriedades desses constituintes da matéria.**

**A física nos surpreende** pela riqueza de detalhes com que pode descrever a matéria. Esse conhecimento, acumulado principalmente no último século, é ainda mais admirável se usarmos como ponto de partida a observação direta dos objetos do nosso dia-a-dia para chegar ao nível profundo de compreensão que se tem hoje sobre o átomo e suas partículas elementares.

Em sua viagem ao interior da matéria – praticamente iniciada no final do século 19, quando o físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940) descobriu o elétron –, a física nos levou à compreensão do núcleo atômico, com seus prótons e nêutrons, e, de forma ainda mais surpreendente, à descoberta que estes últimos são formados por constituintes ainda menores, os quarks.

Compreender os detalhes ínfimos da matéria não é só fundamental para entender o mundo diminuto da matéria, mas também para compreender o universo como um todo, desde sua origem até que destino terá, incluindo até mesmo o surgimento de vida nele.

>>>

Para buscar entender a matéria, temos hoje laboratórios gigantes, como o Fermilab (Estados Unidos) e o Cern (Suíça), dedicados inteiramente à compreensão dos processos de interação entre partículas elementares. Nessas máquinas, de proporções gigantescas, partículas carregadas são aceleradas até que atinjam velocidades próximas à da velocidade da luz, ou seja, 300 mil km/s. A colisão entre elas resulta na produção de um número formidável de novas partículas. Esse número depende da energia liberada na interação e nas energias atingidas pelos aceleradores ele pode chegar a algumas centenas de partículas.

**DESCRIÇÃO BONITA E FUNCIONAL.** Uma das mais importantes confirmações feitas em experimentos nos aceleradores de partículas foi a de que prótons e nêutrons são formados por constituintes ainda menores da matéria, os chamados quarks – o nome foi dado pelo físico americano Murray Gell-Mann, que se inspirou em uma passagem (*"Three quarks for Muster Mark!"*) do romance *Finnegan's Wake*, do escritor irlandês James Joyce (1882-1941).

Para formar prótons e nêutrons, os quarks estão grudados uns aos outros por forças fortíssimas mediadas pelos glúons – a palavra tem origem em *glue*, que, em inglês, significa cola. Previstos há décadas pelos físicos teóricos, os quarks eram considerados, na década de 1960, como meras conveniências matemáticas para se estudar sistematicamente as propriedades das partículas. Entretanto, para a surpresa de muitos, as experiências para se verificar a estrutura do próton – através do espalhamento de elétrons em prótons – revelaram que estes últimos realmente possuem constituintes puntiformes.

Um fato experimental importante é que quarks e glúons não são observados livremente na natureza, como, por exemplo, observamos os elétrons. Isso torna muito mais difícil, mesmo que indiretamente, a confirmação da existência dessas partículas.

Outro fato importante tem a ver com a colisão dos chamados hádrons, partículas caracterizadas por um par quark antiquark (os chamados mésons) ou trios de quarks (os bárions), como mostra a figura 1. Quando levados a colidir entre si, os hádrons fazem surgir novos quarks e antiquarks dessa família. Daí, a multiplicidade de novas partículas provenientes de novos arranjos de quarks e glúons após as colisões em aceleradores.

Falamos, então, de quarks *up* (*u*) e *down* (*d*) primariamente para descrever prótons e nêutrons e, para completar a descrição das partículas, temos ainda os quarks *charm* (*c*), *strange* (*s*), *bottom* (*b*) e *top* (*t*), cada qual com massa e características próprias.

É uma descrição bonita e funcional, pois reduz a compreensão de centenas de partículas ao relacionamento intrincado de seis quarks e respectivos antiquarks, mais oito glúons.

**DOTADOS DE CHARM.** Ao longo de décadas, esses laboratórios têm desenvolvido centenas de experimentos para investigar o papel dos quarks. Esses trabalhos envolvem a cooperação de pesquisadores de todo o mundo. Entre esses experimentos, está o de sigla E781 (Selex), com o qual o Grupo de Bárions Charmosos do CBPF colaborou (ver 'Experimento criou 15 bilhões de colisões').

Bárions charmosos são hádrons com três quarks e que contêm ao menos um quark *charm*. São muito menos co-

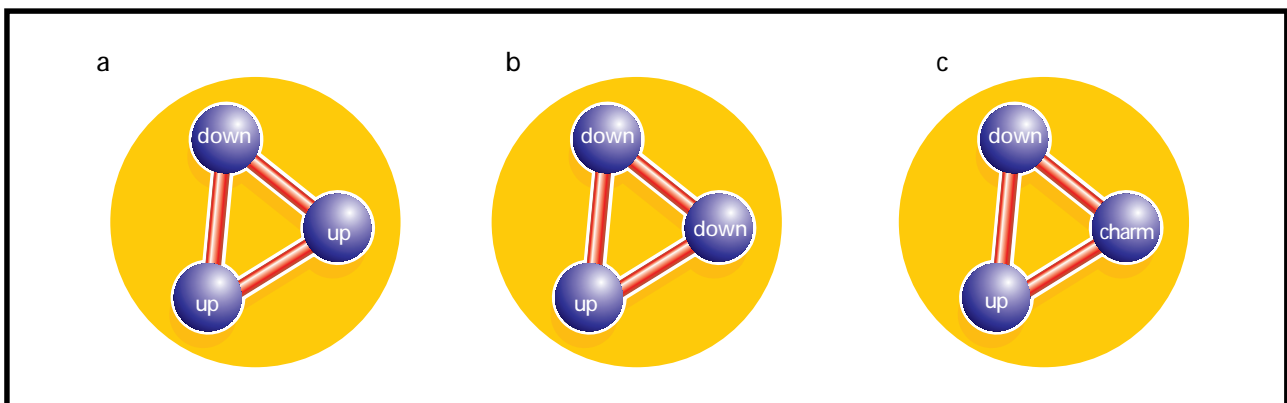


Figura 1. Exemplos de bárions, partículas formadas por três quarks. Em a, representação de um próton (componente do núcleo atômico), que tem carga elétrica +1 e é formado por dois quarks *up* (carga elétrica +2/3) e um quark *down* (-1/3). Em b, um nêutron, outro componente nuclear, que tem carga elétrica nula, sendo formado por dois quarks *down* (-1/3) e um *up* (+2/3). A combinação dos seis quarks existentes pode formar várias outras partículas, como o lambda (item c), constituído por um *up*, um *down* e um quark *charm*, este com carga elétrica +2/3. Partículas formadas por um dupla de quarks são denominadas mésons. Um exemplo são os glúons (aqui representados pelas linhas que unem os quarks), que podem momentaneamente formar um par quark e antiquark.

## EXPERIMENTO CRIOU 15 BILHÕES DE COLISÕES

O experimento E781 foi realizado no Fermilab há quatro anos. Seu objetivo foi estudar, de modo sistemático, os bárions charmosos. Basicamente, o experimento consistiu em efetuar a colisão de prótons contra placas do metal tungstênio. O resultado dos choques é a produção de um feixe de partículas com prótons, méson pi (ou píons), bem como partículas denominadas sigmas.

Os sigmas, por sua vez, colidiram contra placas de cobre e carbono, produzindo, entre outras partículas, um número intenso daquelas contendo o quark *charm* – em particular, as denominadas lambdas charmosos ( $\Lambda_c$ ), que são nosso objeto de estudo.

Na direção em que são produzidas as partículas charmosas, encontra-se um espectrômetro (conjunto de detectores) capaz de identificar as partículas carregadas eletricamente e outras que, mesmo sem carga, podem provocar reação no meio e serem detectadas indiretamente.

O Grupo de Bárions Charmosos do CBPF está analisando os diferentes modos do decai-

mento dos  $\Lambda_c$ , como o decaimento em próton, méson k e méson pi – no jargão da física, denomina-se decaimento o processo pelo qual uma partícula instável dá origem a outras. Para isso, levamos em conta o estado de ‘rotação’ (ou, mais tecnicamente, o spin) das partículas envolvidas no decaimento. Essa análise vai permitir obter informação não somente sobre os diferentes modos de decaimento, mas também sobre a orientação do spin (ou polarização) dos lambdas charmosos produzidos.

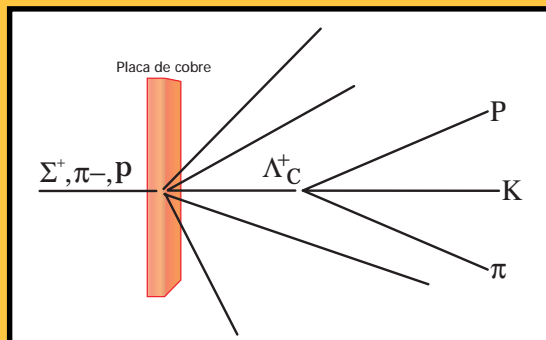


Figura 2. Representação de um possível registro por detectores de um lambda charmoso ( $\Lambda_c$ ) decaindo em próton (p), méson k (k) e méson pi ( $\pi$ ). Para chegar a essa detecção, o experimento E781 colidiu primeiramente prótons contra placas de tungstênio, produzindo novos prótons (p), mésons pi negativos ( $\pi^-$ ) e sigmas positivos ( $\Sigma^+$ ). Estas, por sua vez, colidiram contra placas de cobre, produzindo os lambdas charmosos.

As informações registradas nos detectores, que constituem um banco de dados com milhares de fitas gravadas, é o alvo das análises. Programas especialmente desenvolvidos para esse experimento procuram identificar as diferentes partículas através das intensidades e características dos sinais deixados nos detectores.

Foram produzidas 15,2 bilhões de interações no E781, sendo 1 bilhão selecionados para armazenamento em fita. Na primeira fase da análise dos dados, cerca de 1.400  $\Lambda_c$  foram identificados, esperando-se que na segunda se tenha uma estatística significativa para se obter bons resultados.

Assim, é possível reconstruir as trajetórias das partículas, os pontos em que decaíram, sua energia e sua velocidade (ou momento), entre outras propriedades. A figura 2 ilustra um possível registro pelos detectores do decaimento de uma  $\Lambda_c$ .

Nosso grupo participa da colaboração internacional Selex, do Fermilab (Estados Unidos), que envolve dezenas de instituições em vários países.

nhecidos que os mésons charmosos, por exemplo, compostos por um par quark e antiquark, com pelo menos um deles sendo um *charm*.

Desde 1975 que experiências procuraram investigar os bárions charmosos. Somente quatro anos depois, obteve-se uma prova direta de que essas partículas existem – em particular, a partícula lambda charmoso ( $\Lambda_c$ ) foi detectada em vários experimentos, sendo que sua massa concorda com o que prediz a teoria (ver também nesta edição ‘A física do charm’).

Do ponto de vista experimental, os bárions charmosos são mais difíceis de serem produzidos que os mésons, devido ao fato de serem mais pesados e possuírem estados de rotação (spins) diferentes de zero. Isso, por sua vez, torna o estudo teórico dessas partículas bem mais complexo.

No entanto, estudar os bárions charmosos tem suas recompensas: eles representam um excelente teste para os mo-

delos de partículas com os quais a física trabalha hoje. Assim, em breve, os físicos esperam ampliar seu conhecimento sobre a natureza e as propriedades dos constituintes da matéria que são dotados de *charm*. ■



Edgar Corrêa de Oliveira e Anna Maria Freire Endler

# A ciência e tecnologia das **biocerâmicas**



Figura 1. Cristais de hidroxiapatita vistos através de imagem feita por microscopia eletrônica; no detalhe, implantes de alumina ( $Al_2O_3$ ).

**Biocerâmicas são usadas para reparar, reconstruir e substituir partes do corpo humano, pois se integram bem com o tecido ósseo vivo, estimulando seu crescimento. Estas, entre outras propriedades, fazem desses novos materiais produtos estratégicos no mercado atual.**

**Entre as biocerâmicas,** a hidroxiapatita, mais conhecida pela sigla HAP, ocupa posição de destaque por sua larga aplicação no campo da medicina e da odontologia, como um substituto ósseo e dentário em implantes.

A HAP é um fosfato cerâmico – ou biocerâmica – que tem composição e estrutura similares à fase mineral de ossos e dentes (figura 1). Dependendo de sua pureza, ela pode suportar aquecimentos superiores a 1.200 graus celsius, sem se decompor. Além disso, pode ser modelada como a maioria dos materiais cerâmicos.

Nas aplicações tecnológicas, a HAP é usada no preenchimento de cavidades, na forma de grãos densos ou porosos, bem como no revestimento de implantes metálicos, estes geralmente feitos com o metal titânio. Neste último caso, procura-se melhorar as características dos implantes, combinando-se a resistência mecânica do metal à biocompatibilidade e à atividade biológica do material cerâmico

As propriedades químicas da HAP podem ser modificadas através do método de sua preparação. Para implantes ósseos ou dentários, duráveis por muitos anos, utiliza-se um material pouco solúvel, constituído por hidroxiapatita pura. Quando se deseja que o implante seja reabsorvido pelo corpo, cedendo lugar ao tecido ósseo novo, usa-se uma cerâmica mais solúvel, geralmente constituída por uma mistura de hidroxiapatita com outros fosfatos.

Outra característica da HAP é sua capacidade de adsorção, isto é, de fixar em sua superfície moléculas de outra substância. Essa propriedade faz com que ela possa ser usada em implantes, como suporte para antibióticos e drogas anticancerígenas, além de poder ser empregada também em tratamentos prolongados de infecções e doenças ósseas – neste último caso, liberando aos poucos, na região afetada, as medicação necessária.

**DA QUÍMICA AO MEIO AMBIENTE.** A hidroxiapatita é formada por átomos dos elementos químicos cálcio, fósforo, oxigênio e hidrogênio, arranjados conforme mostra sua fórmula:  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ . O fósforo forma com o oxigênio o grupo fosfato, sendo chamado de grupo hidroxila a ligação entre o oxigênio e o hidrogênio. Esses grupos, juntamente com o cálcio, distribuem-se espacialmente segundo um arranjo em forma hexagonal (figura 2).

Uma das características interessantes dessa estrutura é que ela permite que os grupos hidroxila (OH) sejam retirados com relativa facilidade, gerando canais vazios entre os hexágonos, formados pelos íons de cálcio, por onde podem ser

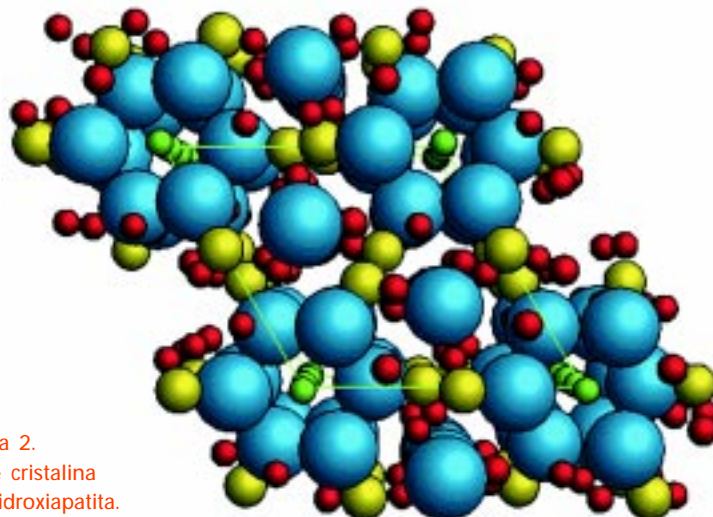


Figura 2.  
Rede cristalina da hidroxiapatita.

conduzidos, para dentro da estrutura do material cerâmico, outros íons e moléculas.

A estrutura dos fosfatos cerâmicos permite que seus constituintes sejam substituídos facilmente por uma grande variedade de complexos e metais, como chumbo ( $\text{Pb}^{+2}$ ), cádmio ( $\text{Cd}^{+2}$ ), cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ), zinco ( $\text{Zn}^{+2}$ ), estrôncio ( $\text{Sr}^{+2}$ ), cobalto ( $\text{Co}^{+2}$ ), ferro ( $\text{Fe}^{+2}$ ), flúor (F), cloro (Cl), bem como grupos carbonatos ( $\text{CO}_3$ ) e vanadatos ( $\text{VO}_4$ ).

Essa propriedade de substituição, somada ao pequeno tamanho dos cristais – que podem chegar a dimensões nanométricas (bilionésimos de metro) –, fazem com que esses materiais possam ser usados como absorvedores ambientais de metais pesados e tóxicos, capazes de descontaminar águas poluídas, rejeitos industriais ou solos poluídos.

Ao mesmo tempo, têm sido proposta aplicações dos fosfatos cerâmicos como catalisadores (substância empregada para acelerar a velocidade de reações químicas) para a decomposição de alcoóis.

**OUTRAS BIOCERÂMICAS.** Além da hidroxiapatita, outros fosfatos de cálcio são usados em aplicações médicas, como é o caso das cerâmicas alumina e zircônia. Estes últimos materiais são estáveis a altas temperaturas, tendo propriedades mecânicas superiores aos dos fosfatos de cálcio, tais como resistência à corrosão, baixo coeficiente de fricção, grande resistência ao desgaste, dureza e resistência ao crescimento de fraturas. Entretanto, não possuem a mesma eficiência na integração com o tecido ósseo que os fosfatos cerâmicos.

Vidros bioativos, que possuem em sua composição fosfato e óxidos de silício, cálcio, sódio, entre outros elementos, constituem também biomateriais com grande atividade biológica e compatibilidade com o tecido ósseo. Mais recentemente, tem-se procurado estimular a bioatividade e a biocompatibilidade dos fosfatos de cálcio, combinando-os com vidros bioativos e com substâncias orgânicas como o colágeno e as proteínas. >>>

Esses procedimentos de bioengenharia visam utilizar esses sistemas combinados para acelerar a regeneração dos tecidos duros.

A pesquisa na área de biomateriais tem sido cada vez mais multidisciplinar, envolvendo pesquisadores tanto teóricos quanto experimentais de várias áreas do conhecimento, como física, engenharia, biologia, medicina e odontologia. (ver 'Estudo multidisciplinar envolve ampla colaboração')

**TECNOLOGIA PRÓPRIA.** No Brasil, apesar dos importantes avanços recentes, podemos considerar a produção tecnológica e científica, bem como a formação de pessoal qualificado, ainda insuficientes em relação às necessidades atuais do país para a área de biomateriais e do potencial do mercado em relação a esse setor. Sendo assim, a demanda por biomateriais é grande e tem sido atendida, quase em sua totalidade, por produtos e tecnologias desenvolvidas no exterior.

Porém, esse cenário vem se alterando nas últimas décadas (ver 'Síntese se une a estudos teóricos e experimentais'). Hoje, o país já conta com vários grupos de pesquisa nessa área em universidades e institutos. E, com isso, vem se dotando de tecnologia própria, bem como de pessoal capacitado para a produção e pesquisa de biocerâmicas. ■

## ESTUDO MULTIDISCIPLINAR ENVOLVE AMPLA COLABORAÇÃO

Hoje, o Grupo de Biomateriais conta com a participação de pesquisadores de várias instituições científicas do estado do Rio de Janeiro. Essas parcerias envolvem o uso comum de laboratórios e de infra-estrutura de apoio à pesquisa, bem como orientações conjuntas de teses, além de organização de seminários e cursos de pós-graduação.

Nosso grupo reúne pesquisadores da Engenharia Metalúrgica e Nuclear da Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), do Departamento de Química Inorgânica do Instituto de Química da UFRJ, do Departamento de Química Analítica da PUC do Rio de Janeiro, da Escola de Saúde Pública da Funda-

ção Oswaldo Cruz, da Embrapa Solos (RJ) e do Departamento de Geografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

O projeto conta com a colaboração internacional do *Institute for Bioengineering and Nanoscience in Advance in Medicine (Northwestern University)* e do Centro de Biomateriais da Universidade de Havana (Cuba).



Em pé: Elena Mavropoulos e Alexandre M. Rossi; sentadas: Andréa Machado Costa e Elizabeth L. Moreira.

## SÍNTESE SE UNE A ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

No CBPF, as pesquisas em materiais biocerâmicos iniciaram-se em 1995, a partir da formação de um núcleo capaz de sintetizar fosfatos cerâmicos por diferentes métodos de preparação. Dois anos depois, foi construído e equipado um laboratório específico para produzir biocerâmicas com alto grau de pureza e composição controlada.

Nosso grupo sintetiza fosfatos cerâmicos com diferentes composições químicas, textura superficial, composição de impurezas e solubilidade. O material é usado para estudos nas diferentes linhas de pesquisa do pro-

jeto, mas também está disponível para outros grupos no país.

Em 1999, pesquisadores do CBPF especialistas em cálculos de estrutura eletrônica de materiais cerâmicos juntaram-se ao projeto, iniciando estudos teóricos sobre a influência de metais e moléculas na estrutura desses fosfatos (ver também nesta edição 'Estrutura eletrônica da matéria'). Em suas diferentes linhas de trabalho, o Grupo de Biomateriais tem procurado combinar a pesquisa teórica com a experimental, em temas como estrutura superficial, reações de superfície e reatividade química e

biológica dos fosfatos cerâmicos. Procura-se, com isso, entender o papel e a influência de complexos moleculares e de metais nas propriedades químicas e biológicas das biocerâmicas.

Essas atividades visam à produção de tecnologia nacional na área de preparação e processamento de biocerâmicas para uso médico e odontológico, bem como às aplicações desses novos materiais como absorventes ambientais e catalisadores. Devido ao caráter multidisciplinar do projeto, nosso grupo procura atuar em forma de rede de pesquisa.

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i$$

# Uma nova entropia

A entropia, um conceito tão rico quanto misterioso, explica, por exemplo, como a energia contida em um pedaço de carvão pode mover uma locomotiva, ou por que, para resfriar a água, a geladeira esquenta por fora. Proposta em meados da década de 1980 como caminho para generalizar a mecânica estatística usual, uma nova fórmula generaliza com sucesso a aplicação da entropia a fenômenos tão díspares quanto ciclones e moléculas gigantes.

**A energia** é um dos conceitos da física com aplicação mais visível no dia-a-dia. Para mover um carro, por exemplo, é necessário obter energia através da queima do combustível. Para os eletrodomésticos funcionarem, depende-se da energia elétrica. Mas nem toda a energia gerada está disponível para ser transformada em trabalho útil. Para saber o quanto dessa energia pode ser considerada 'livre' – disponível para consumo –, é necessário conhecer um outro conceito: o de entropia.

A entropia está relacionada à ordem e desordem em um sistema. É ela que caracteriza o grau de organização (ou desorganização) de um sistema físico qualquer. Quanto mais desordenado o sistema, maior será sua entropia.

A imagem de uma caixa que contenha bolas nos fornece uma boa analogia para entender o conceito de entropia. Se as bolas estiverem ordenadas em um canto, a entropia será baixa, pois o grau de desorganização desse sistema é tam-

bém baixo. E para se manter assim será necessário que o nosso sistema imaginário (caixa mais bolas) permaneça isolado do meio externo. Mas é muito difícil evitar que algum tipo de interação com o ambiente ocorra.

Assim, depois de uma interação qualquer com o exterior – por exemplo, uma trepidação ao ser mudada de lugar –, é bem provável que as bolas se desorganizem, pois há muito mais formas de deixar as bolas espalhadas do que de colocá-las arrumadas em um canto. Em outras palavras: o grau de desorganização (ou entropia) de um sistema físico que interage com o exterior tende a aumentar com o passar do tempo.

**UNIVERSO DESORDENADO.** Algo semelhante se passa entre as bolas de nossa caixa e os sistemas físicos do universo: ambos, com o passar do tempo, tendem a se tornar cada vez mais desorganizados – e isso, conseqüentemente, representa aumento da entropia.

>>>

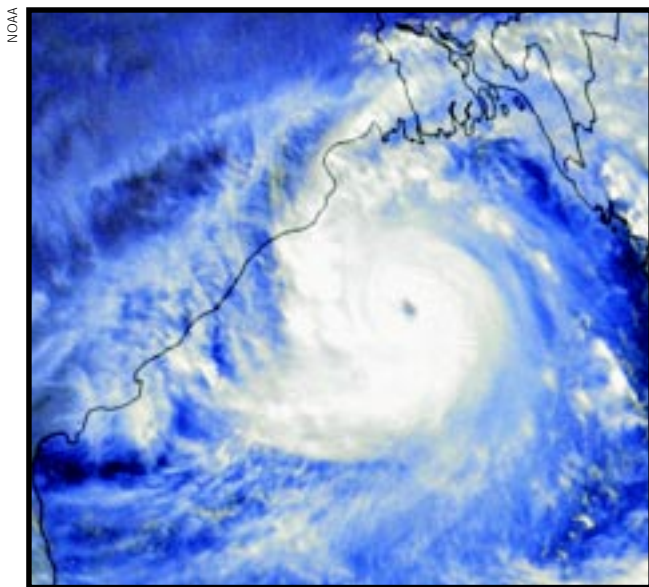


Figura 1. O ciclone, com a turbulência que lhe é associada, é um dos fenômenos naturais ao qual não se pode aplicar com sucesso a fórmula clássica da entropia, que vem sendo utilizada pelos físicos desde o século 19.

Há situações específicas em que a entropia pode diminuir em um sistema físico. No entanto, qualquer redução é imediatamente compensada por seu aumento proporcional – ou até maior – em outra parte do sistema. Em uma geladeira, por exemplo, o resfriamento no interior faz com que entropia desse sistema diminua, pois o calor faz com que os átomos e moléculas fiquem mais agitadas, em maior desordem. Porém, esse fato é amplamente compensado pelo aquecimento do eletrodoméstico por fora, o que representa um aumento de entropia em outra região do mesmo sistema.

**VISÃO HUMANA E CICLONE.** Com frequência, o cálculo da entropia total de um sistema é aproximadamente a soma dos diversos subsistemas contidos nele. Um exemplo simples: a entropia total de duas bolas de sorvete é a soma daquela contida em cada uma delas. Os físicos denominam esse tipo de sistema aditivos (ou extensivos).

No entanto, há fenômenos nos quais a entropia de um subsistema interfere substancialmente na de outro, e nesse caso o total não se resume a uma simples soma das partes – os sistemas agora ganham o nome de não aditivos (ou não extensivos). A visão humana é um caso interessante: em uma parede branca com um ponto vermelho, a percepção fará com que notemos essa marca de imediato. Isso ocorre porque somos descendentes de indivíduos que tinham a capacidade de ver rapidamente um predador (um tigre, por exemplo) e sair correndo com grande rapidez. É muito provável que a linhagem protobiológica dotada de visão ‘aditiva’ – isto é, sem a capacidade de perceber preferencialmente o tigre, bem como o ponto vermelho sobre a parede branca – tenha sido extinta por não ter conseguido se livrar dos predadores ou de outras situações perigosas.

Outro exemplo de sistema não aditivo é a formação de um ciclone (figura 1). Normalmente, as moléculas de ar acima de uma fazenda ou de uma cidade movimentam-se ao

## FÓRMULA CLÁSSICA SURTIU NO SÉCULO 19

O conceito de entropia surgiu na época da máquina a vapor, proposto pelo prussiano Rudolf Emmanuel Clausius (1822-1888) para explicar o máximo de energia que poderia ser transformada em trabalho útil. Mais tarde, a entropia foi relacionada à ordem e desordem de um sistema, idéia aproveitada pelo físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) na elaboração da primeira expressão a descrever microscopicamente o conceito.

Mesmo sem ter certeza da existência de átomos e moléculas – cuja existência só viria a ser confirmada experimentalmente na primeira década do século 20, principalmente pelos tra-

balhos do físico francês Jean Perrin (1870-1942) –, Boltzmann propôs a fórmula baseando-se nas evidências da existência desses elementos. No entanto, sua equação não encontrou apoio imediato. Transtornado pela resistência de alguns colegas em aceitá-la ou mesmo em reconhecer a teoria atômica, Boltzmann suicidou-se em 1906 – a fórmula foi gravada no seu túmulo.

A equação de Boltzmann havia sido retomada pelo professor de física matemática americano Josiah Gibbs (1839-1903), da Universidade de Yale (Estados Unidos). Ele propôs uma nova fórmula, mais abrangente, que inclui certos tipos de interações entre as moléculas.

A chamada fórmula de Boltzmann-Gibbs tem sido usada pelos físicos por cerca de 120 anos. Desde 1988, no entanto, uma nova equação, desenvolvida no CBPF, tem se mostrado extremamente eficiente como uma generalização das idéias dos cientistas pioneiros nessa área.

Em função da repercussão que a nova fórmula obteve e por sua abrangência fenomenológica, o pesquisador do CBPF Constantino Tsallis teve seu nome lançado recentemente ao prêmio Nobel de física.

A candidatura já conta com o apoio de pesquisadores no Brasil e no exterior.

## PROJETO FORMA REDE NACIONAL E INTERNACIONAL DE PESQUISA

O projeto 'Mecânica Estatística de Sistemas Complexos', cuja coordenação está a cargo do CBPF, é um dos projetos do Programa de Núcleos de Excelência (Pronex).

Além da equipe de pesquisadores do CBPF, os trabalhos de pesquisa contam com a colaboração de outros 50 pesquisadores

de várias instituições, sendo 27 delas no exterior.

Essa vasta rede mantém diversas linhas de pesquisa em áreas como autômatos celulares, caos, fractais, genética populacional, magnetismo, redes neuronais e mecânica estatística – nesta última, pesquisa-se a abrangência da nova fórmula.



Sentados: Constantino Tsallis e Aglaé Cristina Navarro de Magalhães; em pé: Evaldo Mendonça Fleury Curado.

acaso e de modo independente – nesse caso, a entropia de dois diminutos volumes de ar pode ser simplesmente adicionada para se chegar à entropia total do sistema. Porém, quando ocorre um rodaminho, a simples adição dos volumes de ar já não é mais capaz de descrever a entropia desse evento – em termos mais técnicos, diz-se que os movimentos das moléculas de ar durante esse fenômeno atmosférico tornam-se altamente correlacionadas, e a entropia de um volume de ar passa a interferir na entropia de outros volumes em sua vizinhança.

**FRACTAIS E DNA.** Assim que foi inicialmente proposto, em 1865, o conceito de entropia foi utilizado para melhorar o desempenho das máquinas necessárias à Revolução Industrial. Ele ajudava a descrever as trocas de calor e o trabalho realizado pelos equipamen-

tos. Mais tarde, o conceito passou a ser aplicado sempre que era necessário basear-se em componentes microscópicos para fazer uma descrição macroscópica de um sistema.

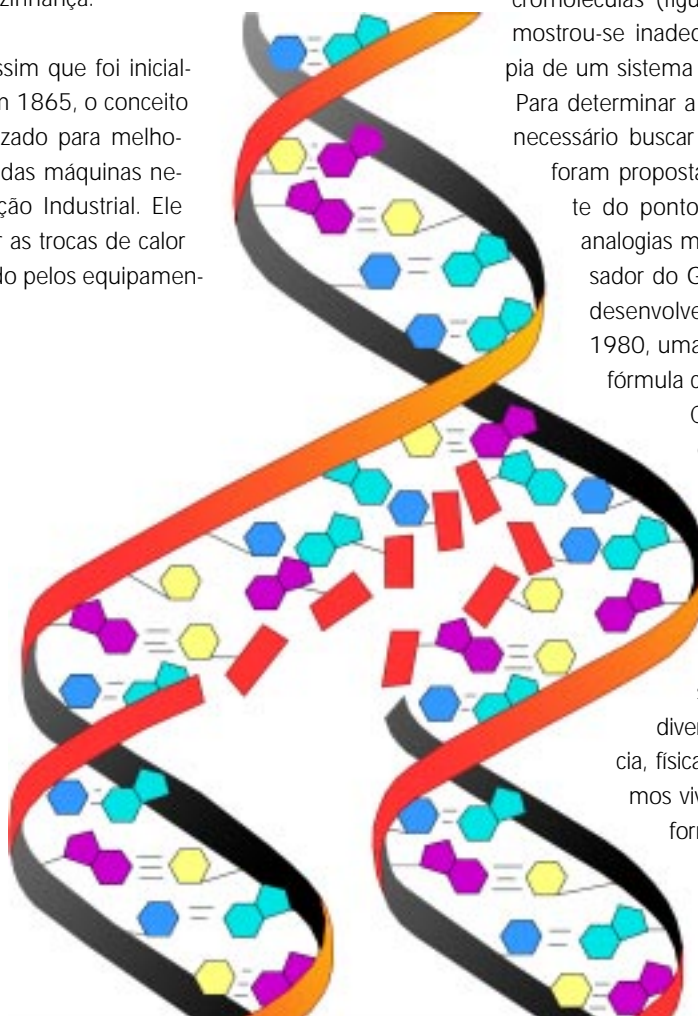
Para calcular a entropia, foi proposta uma equação conhecida como fórmula de Boltzmann-Gibbs (ver 'Fórmula clássica surgiu no século 19'). Porém, a fórmula mostrou ter limitações. Ela falha, por exemplo, ao tentar explicar a complexidade de fenômenos como um ciclone, como já vimos, ou a geometria fractal das moléculas de DNA e de outras macromoléculas (figura 2). Em resumo: a fórmula clássica mostrou-se inadequada quando a quantidade de entropia de um sistema é basicamente não aditiva.

Para determinar a entropia em sistemas não aditivos, foi necessário buscar uma nova fórmula. Várias expressões foram propostas, mas nenhuma se mostrava eficiente do ponto de vista térmico. Porém, a partir de analogias matemáticas, Constantino Tsallis, pesquisador do Grupo de Mecânica Estatística do CBPF, desenvolveu, a partir de meados da década de 1980, uma equação que é uma generalização da fórmula clássica.

Com ela, é possível calcular tanto a entropia de sistemas aditivos quanto de não aditivos. Por algum tempo, a nova fórmula permaneceu sem que fosse comprovada praticamente. Porém, trabalhos recentes têm demonstrado sua eficiência.

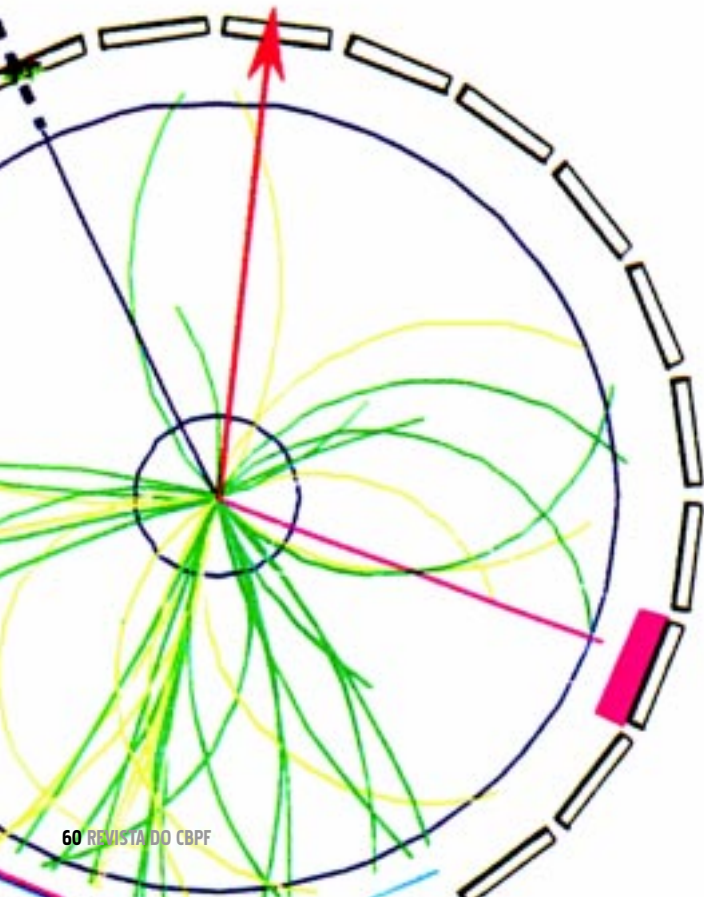
Desde então, a nova fórmula tem sido utilizada para calcular a entropia em diversos sistemas, em áreas como turbulência, física de altas energias, estudo dos organismos vivos, física do estado sólido, teoria da in-formação e até mesmo campos das ciências humanas como a lingüística. ■

Figura 2. Alguns aspectos fractais das moléculas de DNA e de outras macromoléculas têm sido explicada com sucesso usando a nova fórmula para o cálculo da entropia proposta em meados da década de 1980.



# Quatro andares de ciência e tecnologia

A busca de novas partículas e a verificação experimental de teorias complexas da física, embora por si só tarefas de grande importância científica, são apenas parte do que se passa em um experimento de física de partículas.



**Os aceleradores de partículas** estão entre as máquinas mais sofisticadas construídas até hoje pelo homem, competindo em sua complexidade com ônibus espaciais e até mesmo com as estações orbitais. São laboratórios gigantes, com milhares de cientistas e técnicos, para desvendar os segredos dos menores pedaços de matéria que a ciência conhece.

A realização de experimentos nos grandes aceleradores de partículas requer uso de técnicas apuradas em áreas como engenharia civil, mecânica, eletrônica, criogenia, computação, software, entre outras. E, por vezes, é preciso extrapolar os limites de cada um desses campos para desenvolver novos sistemas e equipamentos que devem atender às exigências dos experimentos.

Tudo isso para compreender as forças fundamentais da natureza que agem sobre esses diminutos blocos de matéria – tarefa que, além da grande importância científica, têm desdobramentos essenciais para o conhecimento do universo como um todo.



Figura 1. Visão artística de centenas de partículas que resultam da colisão de um próton com sua antipartícula (antipróton).

**QUATRO ANDARES.** O Tevatron, que pertence ao Fermilab, situado próximo a Chicago (Estados Unidos), é hoje o maior e mais potente acelerador de partículas do mundo. Acoplada a essa máquina, está outro sistema altamente complexo: o detector Dzero, no qual centenas de físicos e engenheiros buscam desvendar os segredos das partículas através da observação do resultado de colisões entre um próton e sua antipartícula, o antipróton.

O Dzero é um dos detectores construídos ao redor de um dos pontos onde ocorrem as colisões no Tevatron. Nesse ponto, um próton e um antipróton, ambos viajando em sentidos opostos e acelerados a velocidade próximas à da luz (cerca de 300 mil km por segundo), colidem de frente, dando origem a centenas de partículas, que deixam rastros nos equipamentos que constituem o detector Dzero (figura 1).

A partir desses rastros, busca-se reconstruir, com o emprego de programas de computador, todo o evento resultante da colisão, incluindo aí partículas cujo tempo médio de vida é de frações infinitesimais de segundo.

O maior feito do Dzero foi a descoberta, em 1995, entre essa multidão de partículas, do chamado quark top, partícula teoricamente prevista mas cuja existência não havia ainda sido constatada devido à sua elevada massa – que era desconhecida – e à raridade com que o quark top é produzido, fazendo com que sua busca se assemelhasse ao trabalho de se encontrar uma agulha em um palheiro quando não se conhece a aparência da agulha.

Ocupando um grande espaço – a altura do detector Dzero corresponde a de um prédio de quatro andares –, detectores devem ser capazes de registrar eventos que ocorrem a taxas de milhões de vezes por segundo, nos quais centenas e centenas de partículas resultam em milhares de registros.

**PIONEIRISMO NO BRASIL.** O Laboratório de Cosmologia e Física Experimental de Altas Energias (Lafex) tem participado ativamente do experimento Dzero desde 1991, tendo atuado

em várias etapas diferentes desse experimento – inclusive da descoberta do quark top – e sido responsável por diversos subsistemas que compõem o detector. Além disso, tem participado da análise de todos os dados colhidos no experimento.

Além da colaboração com o Fermilab, o Lafex participa de outros experimentos de física de partículas, destacando-se a colaboração internacional com o Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern), em Genebra (Suíça), no experimento com o detector Delphi.

A atividade em física experimental de altas energias vem permitindo ao Lafex intensa e profícua atuação na formação de profissionais em diversas áreas. O Lafex tem trabalhado com vários detectores, com sistemas de seleção de eventos, de aquisição de dados, de reconstrução e análise dos dados coletados. Graças às suas necessidades científicas, foi pioneiro grupo de pesquisa no Brasil a usar computação paralela e redes heterogêneas (redes com computadores de diversos tipos e rodando diferentes sistemas operacionais).

**POTES ROMANOS.** Em 1997, o Lafex assumiu a responsabilidade por outro projeto desafiador: o desenvolvimento, bem como a construção, a instalação e a operação, de um novo subsistema de detectores que possibilitam ampliar a capacidade de o Dzero estudar eventos até então de difícil observação.

Esse projeto, conhecido pela sigla FPD (sigla, em inglês, para Detector de Prótons Espalhados a Pequenos Ângulos), abrange a construção de detectores chamados ‘potes romanos’, que, através de um mecanismo de precisão, podem ser aproximados da linha do feixe de partículas, uma região de ultravácuo, sem afetar o desempenho do acelerador (figura 2). Esse conjunto de detectores vai permitir que partículas que viajem muito próximas ao feixe sejam registradas e tenham suas propriedades medidas.

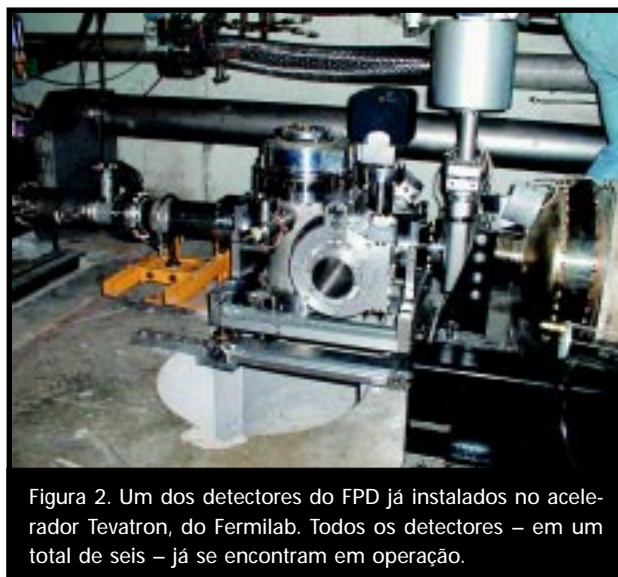


Figura 2. Um dos detectores do FPD já instalados no acelerador Tevatron, do Fermilab. Todos os detectores – em um total de seis – já se encontram em operação.

GRUPO DO DZERO – LAFEX (2000)

>>>

## COLABORAÇÃO ENVOLVE SETE INSTITUIÇÕES

O projeto do Detector de Prótons Espalhados a Pequenos Ângulos (FPD) conta com a colaboração do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, sediado em Campinas (SP), onde os sistemas mecânicos e de vácuo foram construídos.

Além de físicos e engenheiros do CBPF, esse projeto envolve a participação de pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Universidade Federal da Bahia, Universidade Estadual de Campinas e do Instituto de Física Teórica (Universidade Estadual Paulista).

Os detectores são construídos de fibras ópticas e requerem a construção de estruturas de plástico que atendessem às exigências de precisão do projeto. O projeto do FPD utiliza mecânica de precisão, técnicas de ultravácuo, eletrônica de controle, software de simulação e controle, bem como a capacidade de gerenciamento de um projeto científico de grande porte.

A descoberta de novas partículas e o detalhamento das propriedades das já conhecidas são a etapa final dos experimentos em física de partículas. Porém, antes de se chegar a esses resultados, é preciso juntar ciência e tecnologia de fronteira para construir os próprios aceleradores, bem como detectores que devem captar mais e mais detalhes das colisões.

O objetivo final é buscar nos menores constituintes da matéria o caminho para revelar os segredos da maior estrutura conhecida: o universo. ■



Sentados (esq. para dir.): Hélio da Motta e Alberto Santoro; em pé (esq. para dir.): Gilvan Alves e Francisco Caruso.

### GRUPO DE COSMOLOGIA E GRAVITAÇÃO:

Mário Novello  
Ívano Damiano Soares  
José Martins Salim  
Luiz Alberto Oliveira  
Nelson Pinto Neto  
Bartolomeu Figueiredo

### COLABORADORES:

Herman Julio Mosquera Cuesta (pesquisador visitante)  
Sandra Liliansa Sautu (pesquisadora visitante)  
Santiago Esteban Perez Bergliaffa (pesquisador visitante)  
Eduardo Sergio Santini (pós-doutorando)  
Alexandre da Fonseca Velasco (pós-doutorando)  
Martin Makler (doutorando)  
Paulo Israel Trajtenberg (doutorando)  
Ronaldo Penna Neves (doutorando)

NASA EDUCATION SERVICE

**Estaríamos prestes a apresentar uma autêntica revolução paradigmática na cosmologia, com a substituição da atual cosmovisão por uma mais ampla e aperfeiçoada? A resposta a esta pergunta pode vir já na próxima década, com inauguração de novos detectores e telescópios.**

# Uma nova cosmovisão

**O objetivo maior da ciência** é o de gerar uma representação racional do mundo. Essa atividade ganha dimensão máxima quando essa representação se propõe a englobar a totalidade do que existe, isto é, o universo considerado como uma estrutura única e solidária.

O ramo da ciência que se propõe a analisar essa estrutura única é a cosmologia, que se desenvolve através da aplicação do conhecimento global das leis físicas ao universo como um todo. Portanto, essa área do conhecimento é, na prática, o maior teste de coerência dessas leis.

Em particular, a cosmologia assume o caráter de um grande e único laboratório capaz de testar efetivamente fenômenos do microcosmos na área de altas energias que estão longe de poderem ser testados em laboratórios terrestres, pois temperaturas extremamente elevadas, inatingíveis no atual estado de desenvolvimento científico e tecnológico, poderiam ser alcançadas nos primeiros instantes do universo. Desse modo, o microcosmo, representado pela teoria das partículas elementares, e o macrocosmo – a estrutura global do universo – estão se fundindo em um único e ambicioso projeto de pesquisa.

**EXPLOSÃO QUENTE.** A moderna cosmologia relativística tem como suporte observacional as evidências produzidas pela chamada astronomia profunda e, como quadro conceitual de fundo, a teoria da relatividade geral, que permite caracterizar o cenário global em que ocorrem os acontecimentos físicos. Na linguagem técnica da cosmologia, dá-se a esse cenário o nome contínuo espaço-tempo, que é formado pela ‘unificação’ das três dimensões espaciais ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) e da dimensão temporal ( $t$ ). É nele que acontecem os processos físicos relevantes em escala cósmica.

Em 1917, o físico alemão Albert Einstein (1879-1955) promoveu, em sua teoria da relatividade geral, uma fecunda e imprevisível combinação entre a interação gravitacional – a força universal de atração entre as massas, descoberta pelo fi-

Figura 1. Ainda na década de 1920, a descoberta extraordinária do astrônomo Edwin Hubble mostrou que as galáxias encontram-se em um estado dinâmico de afastamento mútuo ou expansão. Com isso, abriu-se caminho para a popularização da imagem da ‘Grande Explosão Primordial’ (em inglês *Big Bang*) como origem do cosmos atual.

sico e matemático inglês Isaac Newton (1642-1727) – e a estrutura geométrica do contínuo espaço-tempo, que permite aos observadores estabelecer o conceito fundamental de intervalo (ou separação) entre eventos.

Deformações ou tensões na tessitura do espaço-tempo passam a ser equivalentes à atuação de forças gravitacionais: geometria torna-se força ou, em outras palavras, a massa de um corpo deforma o espaço e essa deformação determina como as outras massas devem se movimentar.

Os notáveis sucessos da teoria no que toca a fenômenos gravitacionais e eletromagnéticos na escala de nosso Sistema Solar a estabeleceram como o quadro conceitual de fundo no qual se pôde assimilar a extraordinária observação do astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953), na década de 1920, de que o universo astronômico se encontraria, como um todo, em um estado dinâmico de expansão (o chamado ‘afastamento uniforme das galáxias’).

Mais tarde, os estudos do físico russo George Gamow (1904-1968) sobre o comportamento da matéria em um estágio primordial muito denso e quente iriam servir para consolidar, já na década de 1970, o chamado modelo padrão da ‘Grande Explosão Quente’ (ou, em inglês, *Hot Big Bang*).

**UMA DISCIPLINA DA FÍSICA.** Hoje, as observações de que dispomos nos delineiam o panorama de um universo muitíssimo vasto, bem como expansivo – ou seja, transiente, dinâmico, evolutivo – e notavelmente homogêneo – mais ‘liso’, ou uniforme, que a superfície de uma bola de bilhar.

&gt;&gt;&gt;



Figura 2. A imagem mais penetrante que jamais se obteve do cosmos, feita pela câmara de campo profundo (*Deep Field Camera*) do telescópio espacial norte-americano Hubble, entre 18 e 30 de dezembro de 1995, mostrando milhares e milhares de galáxias que jamais haviam sido vistas, cada uma composta por bilhões de estrelas, estendendo-se ao longo da inimaginável distância de dez bilhões de anos-luz.

Em conjugação com as teorias de unificação da física de partículas elementares, os modelos cosmológicos que tratam o universo como homogêneo permitiram a elaboração de uma ‘história térmica’ da matéria presente no cosmos, constituindo um quadro descritivo bem aproximado que abrange desde um prodigioso ‘disparo’ inicial (*Big Bang*), que assinalaria a entrada em existência do próprio universo, até a fase homogênea, pouco densa e moderadamente expansiva que testemunhamos hoje.

Esses elementos fundamentaram a instalação, na década passada, do modelo da ‘Grande Explosão Quente’ como o paradigma do conhecimento cosmológico contemporâneo. O Modelo Padrão, de fato, foi bem-sucedido em incorporar as evidências da expansão cosmológica e da presença de uma radiação térmica ‘fóssil’ – a chamada radiação cósmica de fundo de 2,7 kelvin, temperatura equivalente a cerca de 270 graus celsius negativos –, bem como em reproduzir adequadamente as abundâncias globais observadas dos elementos químicos.

Assim, pela primeira vez, foi produzida uma cosmogonia legitimamente científica, por ser verificável pela observação. A cosmologia tornou-se assim uma disciplina própria da física.

**MODELO EM DIFICULDADES.** Apesar desses sucessos, o Modelo Padrão apresenta uma série de graves dificuldades técnicas e filosóficas que podemos agrupar genericamente sob dois títulos:

1. **problemas das condições iniciais:** origem da homogeneidade hoje verificada; natureza da ‘matéria escura’ que comporia

## PROGRAMA DE PESQUISA TEM VASTO NÚMERO DE TEMAS

Desde sua criação, na primeira metade da década de 1970, o Grupo de Cosmologia e Gravitação, ligado ao Laboratório de Cosmologia e Física Experimental de Altas Energias (Lafex), do CBPF, tem participado ativamente da produção científica do país. Alguns dados atestam de forma inequívoca essa contribuição: realização de 32 teses de mestrado e 18 de doutorado; publicação de mais de 200 artigos científicos em revistas científicas brasileiras e internacionais de prestígio; a apresentação de aproximadamente uma centena de trabalhos em vários eventos científicos no Brasil e no exterior; produção de uma dezena de livros e mais 40 capítulos em outras obras – entre esses livros estão os *Anais das*

*Escolas de Cosmologia e Gravitação*, encontro organizado e sediado no CBPF que vem se realizando, sem interrupção, nos últimos 20 anos.

Além disso, nosso grupo tem mantido um intenso intercâmbio com institutos e universidades brasileiras e estrangeiras, recebendo recentemente convite para ingressar na prestigiosa rede ICRA (*International Center for Relativistic Astrophysics*) – ver nesta edição a seção ‘Tome Nota’.

A seguir, apresentamos um breve resumo das principais linhas de pesquisa seguidas pelo Grupo de Cosmologia e Gravitação do CBPF, ressaltando que os temas mencionados são interligados e formam um único e abrangente programa de pesquisas:

Exame de uma alternativa competitiva à teoria da relatividade geral; estudo da interação gravitacional em curto alcance; investigação das propriedades do universo em sua fase extremamente densa, mas não singular (nesse tema, nosso grupo desenvolveu um trabalho de análise de questões cosmológicas denominado ‘Programa do Universo Eterno’); estudo sobre a formação de galáxias e aglomerados de galáxias; exame da estabilidade dos modelos cosmológicos (do tipo homogêneos e isotrópicos); estudo das definições, ainda incompletas, do conceito de energia gravitacional; construção teórica de uma ‘cápsula causal’, onde seriam possíveis curvas temporais fechadas (ou ‘viagens no tempo’); formulação de um modelo

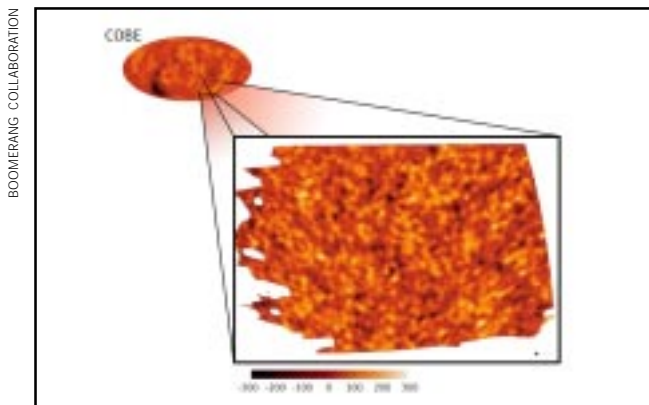


Figura 3. Ao final de 2000, um balão flutuando sobre a gélida superfície da Antártida proporcionou a melhor visão já obtida sobre o universo primordial. Medindo as irregularidades da radiação cósmica de fundo de 2,7 kelvin, o experimento Boomerang mostrou que, em seus primórdios, o cosmos era extremamente homogêneo e regular – na verdade, cem vezes mais ‘liso’ que uma bola de bilhar.

a maior parte do conteúdo material do cosmos; problema da formação de estruturas como aglomerados e galáxias;

**2. problemas da singularidade:** valores infinitos que as grandezas físicas adquirem na origem explosiva do universo; proveniência inescrutável das leis físicas, dado que a singularidade inicial é uma fronteira absoluta para todo o conhecimento.

Esses aspectos incômodos, bem como a escassez de observações definitivas sobre o comportamento dos campos físicos sob condições extremas (ou seja, não-solares) conduziram ao surgimento, nos últimos anos, de uma série de propostas alternativas visando eliminar – ou ao menos atenuar – as características problemáticas exibidas pelo Modelo Padrão, através da alteração ou substituição de alguns dos ingredientes básicos em jogo (ver ‘Programa de pesquisa tem vasto número de temas’).

aplicável ao universo em seus primeiros instantes, com base na unificação da teoria da relatividade geral e da mecânica quântica; aplicação da teoria quântica a espaços curvos; verificação teórica da existência de sistemas puramente eletromagnéticos semelhantes a sistemas gravitacionais (por exemplo, a possibilidade de haver buracos negros eletromagnéticos); investigação de sistemas macroscópicos em interação com o campo gravitacional; busca de evidências sobre a mudança da estrutura (topologia) do espaço nos primórdios da evolução do universo; e aplicação do conceito de caos ao problema de formação de estruturas como galáxias e aglomerados de galáxias.

**PERSPECTIVA EXCITANTE.** Assim, parece crescer entre os cosmólogos o entendimento de que a cosmogonia associada ao Modelo Padrão singular, que prevê toda a massa do universo ‘compactada’ em um ponto adimensional antes da ‘detonação’ inicial, representaria um estágio preliminar de uma teoria cosmológica mais completa, ainda por ser estabelecida. Por exemplo, diferentes abordagens, clássicas e quânticas, têm coincidido na obtenção de cenários homogêneos, porém não singulares, compatíveis com modelos de universos eternos, sem ‘princípio’ nem ‘fim’. Caberia, então, indagar: estaríamos a ponto de presenciar uma autêntica transição ou revolução paradigmática na cosmologia?

A resposta a essa pergunta só virá com a obtenção de novas evidências cósmicas que poderão regular a seleção entre as variadas abordagens em curso hoje em dia e definir as linhas gerais de uma cosmovisão reconhecidamente mais aperfeiçoada. A inauguração, na presente década, de aparatos de medida inovadores – detectores de ondas gravitacionais e de neutrinos cósmicos, bem como de novos telescópios terrestres e espaciais – permitirá pôr em teste muitas de nossas atuais concepções fundamentais sobre o universo em larga escala – inclusive sobre a própria teoria da relatividade geral –, permitindo antecipar a excitante perspectiva de importantes inovações em curto e médio prazos. ■



Sentados (esq. para dir.): José Martins Salim, Mário Novello e Ivano Damiano Soares; em pé (esq. para dir.): Nelson Pinto Neto, Santiago Esteban Perez Bergliaffa, Herman Julio Mosquera Cuesta e Eduardo V. Tonini.

## COLABORADORES

Alexandre Lopes de Oliveira (doutorando)  
e Viviana P. Rammuni (doutoranda)

# A supercondutividade

Descoberta há exatos 90 anos, a supercondutividade é hoje um dos campos mais intensos de pesquisa em física. O entendimento mais recente do fenômeno já levou a desdobramentos práticos, como ímãs especiais, fios supercondutores e protótipos de trens que flutuam sem atrito sobre trilhos magnéticos. Porém, muitas questões permanecem sem resposta.



Mesmo com espessura final cerca de 100 vezes inferior, três fitas supercondutoras como a mostrada acima (prateada) têm praticamente a mesma capacidade de condução que o cabo formado por dezenas de fios de cobre.

**No início do século 20**, nomes como Hendrik Lorentz (1853-1928) e Paul Ehrenfest (1880-1933) – para citar apenas dois deles – ajudaram a transformar a Holanda em um dos principais centros de pesquisa em física do mundo. Foi também nesse país que, há exatos 90 anos, foi descoberto um dos fenômenos mais notáveis da natureza, a supercondutividade, que hoje é um dos campos mais ativos e profícuos da física teórica e experimental, principalmente pela vasta gama de aplicações que se vislumbra para os chamados materiais supercondutores.

A supercondutividade foi observada pela primeira vez em 1911 na Holanda pelo físico Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926). Ao resfriar mercúrio, estanho e chumbo a baixíssimas temperaturas, próximas ao zero absoluto (ou 273 graus celsius negativos), esse professor da Universidade de Leiden, importante centro de pesquisa daquele país, descobriu que esses elementos passavam a conduzir corrente elétrica sem dissipar calor, ou seja, a resistência elétrica torna-se praticamente nula, o que permite aos elétrons se movimentarem livremente através da estrutura cristalina desses materiais.

EXTRAÍDO DE [HTTP://WWW.AMSUPER.COM/](http://www.amsuper.com/)

Além da descoberta do fenômeno da supercondutividade, Kamerlingh-Onnes foi o primeiro a obter hélio na forma líquida. Por essas e outras contribuições à física de baixas temperaturas, denominada criogenia, ele ganhou o Nobel de física de 1913.

**O ZERO INATINGÍVEL.** Em um condutor convencional – um fio de cobre, por exemplo –, o percurso dos elétrons é dificultado pelos choques contra a estrutura cristalina do material e as impurezas presentes nela. Essa estrutura sofre vibrações principalmente devido ao calor a que o material está submetido. Essas vibrações elásticas devidas ao calor são denominadas fônons.

Os fônons impedem então que os elétrons, que são os portadores convencionais de carga em uma corrente elétrica, percorram essa grade cristalina sem choques. Dessas colisões é que surge a dissipação de calor que se observa em qualquer material que conduz eletricidade – essa perda de calor é denominada efeito Joule, em homenagem ao físico inglês James Joule (1818-1889), que deduziu a lei que rege esse fenômeno.

Diminuir a temperatura de um condutor elétrico faz com que essas vibrações diminuam e, teoricamente, quando o condutor atinge a temperatura de zero absoluto (ou zero kelvin), os fônons desaparecem por completo. Nesse cenário de extrema refrigeração, cessariam os choques dos elétrons contra a estrutura cristalina, e a dissipação de calor também acabaria. Dependendo da pureza do condutor, permanecem só as colisões contra possíveis impurezas, como átomos ou moléculas de outro material que estariam contaminando o condutor, bem como contra as chamadas vacâncias ('vazios' da estrutura cristalina).

No entanto, é preciso ressaltar que o zero absoluto (ou zero kelvin) é inatingível para qualquer material da natureza. Sem entrar em detalhes, apenas adiantamos ao leitor que essa inviabilidade é explicada pelo princípio de incerteza, proposto em 1927 pelo físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976). Porém, hoje, os experimentos já chegam a temperaturas muito próximas ao zero absoluto, da ordem de centésimos de kelvin.

**EXPULSÃO DO CAMPO.** Cerca de duas décadas depois de descoberta a supercondutividade, já havia uma teoria para explicar detalhes do fenômeno, desenvolvida pelo físico teuto-americano Fritz London (1900-1954), que se baseou na teoria do eletromagnetismo, criada pelo físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) ainda no século 19.



Ímã supercondutor empregado no LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons), acelerador que está sendo construído pelo Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern), em Genebra (Suíça).

Com as chamadas equações de London, foi possível entender um efeito tão surpreendente quanto a própria supercondutividade: o efeito Meissner, assim batizado em homenagem ao físico Walther Meissner em 1933. Nesse fenômeno, observa-se que materiais, ao atingirem a fase de supercondução, têm a capacidade de expulsar campos magnéticos. Foi com esse ferramental teórico, publicado em 1935 com a ajuda do irmão, Heinz London, que se explicou por que um campo magnético intenso, a partir de um certo valor, tem a capacidade de destruir a supercondutividade.

**TEORIA BCS.** Porém, à medida que novos fenômenos surgiam, os pesquisadores percebiam que o modelo fenomenológico não era satisfatório para responder a várias questões sobre a supercondutividade. Ainda em 1906, o físico alemão Albert Einstein (1879-1955) já havia inaugurado a aplicação de uma então recente teoria, a teoria quântica, para entender fenômenos relacionados ao calor nos sólidos – mais especificamente, Einstein aplicou o conceito de quantum (pacote de energia) para explicar certas propriedades térmicas dos sólidos (o chamado calor específico). Com esse trabalho, inaugurou a área hoje denominada teoria quântica da matéria condensada.

&gt;&gt;&gt;

Foi, no entanto, na década de 1920 que surgiu um desdobramento mais consistente dessa teoria: a mecânica quântica, com a qual os físicos hoje tratam os fenômenos na escala dos átomos e das moléculas. Porém, só em 1957 surgiria uma teoria microscópica (ou quântica) para a supercondutividade, através dos trabalhos dos físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991), Leon Cooper e John Schrieffer. E ainda hoje a teoria BCS, batizada com as iniciais dos autores, é a referência para os estudos da área. O trabalho rendeu aos três o Nobel de física de 1972.

Ainda em 1956, Cooper publicou um artigo no qual fazia uma previsão teórica importante: os elétrons durante a fase supercondutora, isto é, quando as vibrações da rede cristalina não interferem nas trajetórias dessas partículas, formam pares e passam a se comportar como se fossem uma entidade única. Esse acoplamento ganhou o nome de pares de Cooper, e sabe-se, com base em experimentos, que, quanto menor a temperatura do material, mais pares desse tipo são formados.

**POR QUE NEM TODOS SÃO?** Apesar da abrangência teórica, a teoria BCS se deparou com dificuldades frente a alguns fatos teóricos e fenômenos experimentais. A primeira limitação da teoria é que ela não pode apontar de antemão que material será um supercondutor. Ela também não responde, por exemplo, a uma pergunta simples: por que todos os sólidos não são supercondutores? E a resposta para esta última questão ainda permanece um mistério – sabe-se, no entanto, que bons condutores de eletricidade (cobre, alumínio entre outros metais) não são bons supercondutores (ver ‘O que é um bom supercondutor?’).

A teoria BCS também sugere que não poderia haver supercondutividade a temperaturas acima de 25 kelvins aproximadamente (ou 248 graus celsius negativos), pois o acoplamento que mantém os elétrons formando pares de Cooper seria desfeito por vibrações da rede, por exemplo.

**ARRANHÃO NO STATUS.** Porém, no início de 1980, verificou-se que tipos especiais de cerâmicas eram supercondutoras a tem-

## O QUE É UM BOM SUPERCONDUTOR?

A classe dos materiais supercondutores não é homogênea. Há aqueles que se mostram mais eficientes na condução de eletricidade, porém neles o fenômeno só surge a temperaturas muito baixas, o que inviabiliza certas aplicações do material. Outros se tornam supercondutores a altas temperaturas (cerca de 200 graus celsius negativos), mas nem sempre conduzem uma quantidade de corrente elétrica (ou densidade de corrente) suficiente.

Um bom supercondutor deve ter três características básicas. Sua temperatura crítica, a partir da qual surge a supercondutividade, deve ser alta. O ideal é que seja acima de 80 kelvins (193 graus celsius negativos), pois, nesse faixa, é possível refrigerá-lo com nitrogênio líquido, que é abundante e



Seção de um cabo supercondutor empregado em ímã também supercondutor usado do acelerador LHC.

relativamente barato – para temperaturas mais baixas, é preciso usar hélio líquido, matéria-prima cara e escassa. Essa passagem da condutividade para a supercondutividade deve acontecer de maneira ‘brusca’ – os físicos preferem o termo ‘sharp’ (em inglês, pontiagudo).

Um bom supercondutor deve ainda

ter a capacidade de expulsar um campo magnético que age sobre ele, para que a supercondutividade não seja destruída, por exemplo, pela ação de um relâmpago ou de outra fonte magnética exterior, o que seria outro fato a inviabilizar sua aplicação.

Por fim, é preciso que ele conduza uma alta densidade de corrente elétrica, sendo esta talvez sua característica mais importante do ponto de vista prático. Hoje, em situações especiais, cabos supercondutores já substituem os

centenários fios de cobre (ver figura).

Nosso trabalho de pesquisa envolve colaborações com doutorandos do próprio CBPF, bem como com pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro, da Universidade Federal Fluminense e da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

## TEORIA APRIMORADA AINDA É CONSISTENTE

Uma das principais linhas de pesquisa do Grupo de Estrutura Eletrônica e Fenômenos Coletivos da Matéria Condensada do CBPF tem sido mostrar que a teoria BCS, em sua forma aprimorada, é ainda compatível com os dados experimentais.

A partir de 1992, o grupo passou a publicar em revistas internacionais de prestígio uma série de trabalhos que mostram que, submetida a um refinamento teórico, a teoria BCS não precisa ser a priori descartada quando se trata de explicar e entender discrepâncias experimentais relacionadas ao chamado efeito isotópico. Grosso modo, esse efeito pode ser descrito da seguinte forma: a teoria BCS prevê que a temperatura crítica

– aquela a partir da qual a supercondutividade se manifesta – é fortemente dependente da massa dos átomos que formam o supercondutor. Porém, experimentalmente, verifica-se que essa relação temperatura crítica-massa não é tão intensa assim.

Os trabalhos de nosso grupo têm mostrado que o aprimoramento da teoria leva a desvios significativos em relação à teoria BCS convencional, porém não a descarta como referência para explicar a supercondutividade em materiais como o nióbio – do qual o Brasil tem grandes reservas – e as cerâmicas supercondutoras, cujos dados experimentais fogem às previsões da teoria convencional.

Mais recentemente, nosso grupo tem ampliado suas linhas de pesquisa

e trabalhado em duas frentes extras: na intrigante relação entre ferromagnetismo e supercondutividade – há indícios experimentais de que esses dois fenômenos podem coexistir em certos materiais sem que os pares de Cooper sejam ‘destruídos’. Outro tema são os chamados ‘*stripes*’. Experimentos muito recentes mostraram que nos supercondutores a altas temperaturas há uma temperatura, designada por  $T^*$ , que serve como um ‘prenúncio’ de que o material, em breve, irá apresentar a supercondutividade. Acredita-se que através do entendimento da  $T^*$  será possível responder a uma série de questões que ainda permanecem em aberto nessa área.

peraturas por volta de 70 kelvins (ou cerca de 200 graus celsius negativos). Desde então, vários outros materiais têm demonstrado o fenômeno da supercondutividade a altas temperaturas, acima de 100 kelvins – vale ressaltar a descoberta recente de um composto promissor, à base de boro e magnésio ( $MgB_2$ ), que vem sendo objeto de intensos estudos teóricos e experimentais.

Mesmo antes de enfrentar as dificuldades com a supercondutividade a altas temperaturas, a teoria BCS já havia sofrido outros arranhões em seu status de teoria de referência: discrepâncias experimentais em relação ao chamado efeito isotópico, que está relacionado com a massa do átomos que formam um supercondutor – contrariando a teoria BCS, experimentos mostram que a variação no fenômeno da supercondutividade não é tão intenso. No entanto, pesquisadores brasileiros vêm mostrando, desde o início da década de 1990, que é possível explicar esses desvios experimentais dentro do âmbito da teoria BCS. (ver ‘Teoria aprimorada ainda é consistente’).

**PROBLEMAS EM ABERTO.** Passado quase um século do descobrimento da supercondutividade, o fenômeno continua sendo um intenso campo de pesquisa. Apesar dos tremendos avanços do conhecimento e das aplicações que empregam supercondutores – por exemplo, os ímãs e fios supercondutores já são usados em aceleradores de partículas, bem como protótipos de trens, ainda em fase experimental, flutuam sobre trilhos

magnéticos –, há ainda uma extensa gama de perguntas a serem respondidas. Talvez, a principal delas seja quais mecanismos microscópicos possibilitariam a supercondutividade a altas temperaturas?

Esta e outras questões permanecem em aberto. No entanto, elas conferem um fascínio extra ao fenômeno da supercondutividade e, com certeza, servem como uma motivação a mais para os cientistas dessa área. ■



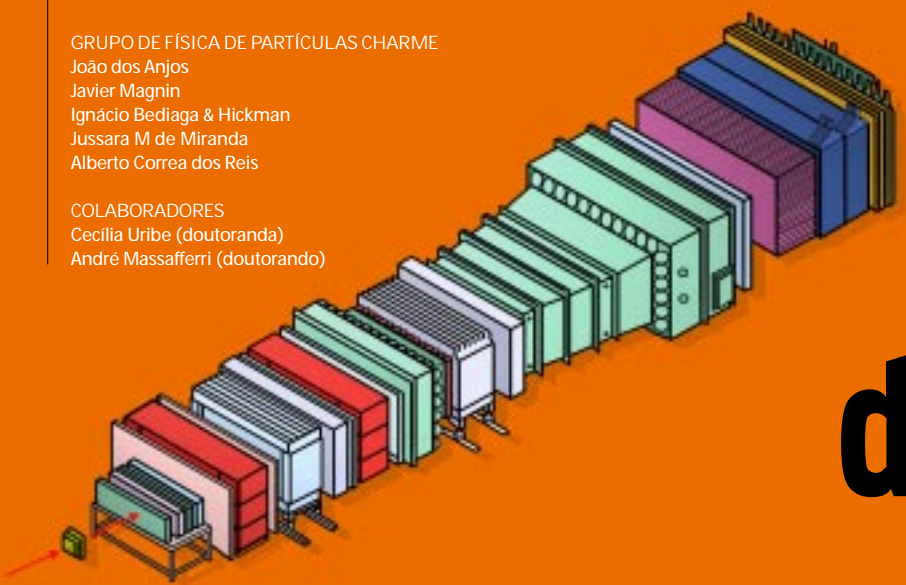
Sentados (esq. para dir.): Viviana P. Rammuni e Amós Troper; em pé (esq. para dir.): Alexandre Lopes de Oliveira, Marcus V. Tovar Costa e Nilson Antunes de Oliveira.

GRUPO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS CHARME

João dos Anjos  
Javier Magnin  
Ignácio Bediaga & Hickman  
Jussara M de Miranda  
Alberto Correa dos Reis








COLABORADORES

Cecília Uribe (doutoranda)  
André Massafferri (doutorando)



# A física do charm

Espectômetro da experiência E-791

-  detector de posição trilhas de silício
-  identificação de partículas Cerenkov
-  detector de posição câmaras multifilares
-  ímãs defletores de partículas carregadas
-  detector de energia calorímetro eletromagnético
-  detector de energia calorímetro hadrônico
-  absorvedor de partículas parede de aço
-  detector de múons cintiladores plásticos

Dotado de fenomenologia particularmente rica, o estudo das chamadas partículas charmosas tem sido, além de um laboratório para testar e refinar teorias sobre a interação entre a matéria, um instrumento poderoso para a observação de partículas que, até recentemente, driblavam os mais rigorosos experimentos.

**A natureza apresenta** uma grande variedade de partículas que formam o mundo à nossa volta. Provavelmente, as mais conhecidas são o elétron (a partícula básica envolvida na eletricidade), o próton e o nêutron (constituintes do núcleo atômico), bem como o méson pi, cuja descoberta desempenhou um papel importante para a fundação do CBPF .

De maneira esquemática, as partículas elementares (ou 'indivisíveis') podem ser classificadas em dois grupos:

**1) Bósons de calibre:** são partículas envolvidas na transmissão das quatro forças (ou interações, como preferem os físicos) da natureza. São eles, o fóton (responsável pela força eletromagnética), os bósons vetoriais  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$  (força fraca), os glúons (força forte) e os grávitons (partícula prevista teoricamente, porém ainda não detectada, responsável pela força gravitacional).

Antes de mencionarmos o segundo grupo de partículas elementares, vale aqui uma breve descrição das quatro forças da natureza. São elas: a força gravitacional, que mantém a Terra girando em torno do Sol ou que traz de volta à superfície

bóson	carga	massa
g	0	0
$W^+$	+1	80,42
$W^-$	-1	80,42
Z	0	91,19
g	0	0

CEDIDO PELOS AUTORES

Figura 1. Tabela com os tipos, as cargas elétricas e as massas dos bósons de calibre – as massas estão em GeV (bilhões de elétrons-volt).

um objeto atirado para cima; a força forte, que mantém os núcleos atômicos coesos; a força fraca, envolvida em certos tipos de radiação nuclear; e, finalmente, a força eletromagnética, responsável, por exemplo, pelo atrito entre os corpos.

**2) Férmions:** são as partículas que formam a matéria ordinária do nosso dia-a-dia. Dividem-se em léptons e quarks, sendo que cada um desses subgrupos apresenta três famílias. Os léptons podem ou não ter carga elétrica (figura 2). Quanto aos quarks, são as fontes da força forte e todos têm carga elétrica fracionária (figura 3). As forças eletromagnética e fraca atuam tanto sobre os léptons quanto os quarks. Quanto à força forte, ela age somente sobre os quarks, que contêm uma propriedade adicional, denominada carga de cor.

**SEMPRE CONFINADOS.** Os quarks não podem ser observados livres, mas apenas formando partículas com estrutura, como prótons, nêutrons e mésons pi (hoje denominados píons). A propriedade que impede que os quarks sejam observados isoladamente é denominada confinamento das interações fortes.

Partículas compostas por quarks são denominadas genericamente hádrons. Podem ainda ser classificadas em dois grandes grupos: mésons (formados por um quark e um antiquark) e bárions (formados por três quarks) – exemplos destes últimos são os prótons e os nêutrons.

Uma descrição mais detalhada das propriedades das partículas elementares e dos hádrons pode ser encontrada em [http://pdg.ift.unesp.br/2000/contents\\_tables.html](http://pdg.ift.unesp.br/2000/contents_tables.html)

**CONE GIGANTESCO.** Os experimentos de que o Grupo de Charm do CBPF tem participado foram realizados no acelerador de partículas Tevatron, do Fermilab, centro de pesquisas que fica próximo a Chicago (Estados Unidos). Para a realização desses experimentos, denominados E691, E769, E791

quarks	1ª família	2ª família	3ª família	carga
	u up	c charm	t top	+2/3
	d down	s strange	b bottom	-1/3

Figura 3. Assim como os léptons, os quarks apresentam-se em três famílias. As massas dos quarks variam de 2 keV (mil elétrons-volt) até 170 GeV (bilhões de elétrons-volt), esta última referente ao quark *top*. Na região azul, estão os quarks classificados como pesados.

e E831, foram feitas colaborações entre cerca de 20 instituições de pesquisa de vários países do mundo, incluindo o CBPF. Como resultado desse esforço, foram publicados dezenas de artigos em revistas de prestígio internacional, com resultados importantes na área de física de partículas.

O experimento E791, por exemplo, consistiu na colisão de um feixe de píons contra um material sólido (alvo) situado no início de um detector com cerca de 20 metros de comprimento cuja forma lembra um cone gigantesco (figura da abertura). Esses choques, altamente energéticos, produzem dezenas de partículas, entre elas os chamados hádrons charmosos, que contêm em sua estrutura pelo menos um quark *charm*.

Detectores usados nessas experiências são equipamentos altamente sofisticados (ver também nesta edição 'Quatro andares de ciência e tecnologia' e 'Precisão e sensibilidade'). Essa aparelhagem tem a capacidade de detectar, com extrema precisão, várias propriedades físicas (por exemplo, energia, carga elétrica e quantidade de movimento) de cada uma das partículas que o atravessam.

O grande número de colisões, cerca de 20 bilhões, registradas e gravadas em fita magnética, bem como a boa resolução obtida nesse experimento, estão permitindo que se chegue a medidas refinadas tanto sobre a produção quanto a desintegração das partículas charmosas (ver 'História se completa cinco décadas depois').

léptons	1ª família	2ª família	3ª família	carga
neutrinos	$\nu_e$ neutrino do elétron	$\nu_\mu$ neutrino do múon	$\nu_\tau$ neutrino do tau	0
léptons com carga elétrica	e elétron	$\mu$ múon	$\tau$ tau	-1

Figura 2. As três famílias de léptons, partículas que se apresentam com carga elétrica zero e -1 (em comparação com a carga do elétron). As massas variam de 0,51 MeV (massa do elétron) até 1,7 GeV (massa do tau). Os neutrinos foram inicialmente tidos como partículas sem massa, porém sabe-se hoje que eles devem ter uma massa pequena segundo, os últimos resultados de dois importantes experimentos nessa área, *SuperKamioKande* (Japão) e *Sudbury Neutrino Observatory* (Canadá).

**TRÊS ETAPAS.** O estudo da produção de hádrons pesados é importante por ser um laboratório para testar a teoria que explica como a matéria interage através da força forte – essa teoria leva o nome cromodinâmica quântica.

De um modo geral, espera-se que hádrons contendo quarks pesados – como é o caso dos hádrons charmosos – sejam produzidos em três etapas. Primeiramente, deve ocorrer a destruição das partículas que estão colidindo e a liberação de seus quarks constituintes. Depois, esses quarks devem interagir com um glúon e produzir um par de quarks *charm*. A última etapa tem a ver com o cha-

## HISTÓRIA SE COMPLETA CINCO DÉCADAS DEPOIS

As atividades teóricas e experimentais do Grupo de Charm do CBPF têm se concentrado tanto na produção quanto na desintegração de hádrons charmosos. No entanto, nosso grupo dedica-se a outras duas linhas de pesquisa:

- aspectos teóricos ainda mal compreendidos da teoria das forças fortes (área tecnicamente denominada estrutura não perturbativa do mar de hádrons);
- produção de hádrons a partir da energia resultante do processo de aniquilação elétron-pósitron;
- aspectos teóricos da teoria das interações eletrofracas, em particular aqueles relativos à violação da simetria de Carga-Paridade (CP).

Na parte experimental, nosso grupo tem estudado as assimetrias na produção de bárions charmosos do tipo lambda ( $L_c^+$ ) e ( $L_c^-$ ) no experimento E791 (ver também nesta edição 'Os bárions charmosos'). Na linha teórica, propusemos recentemente um modelo no qual os quarks que compõem a estrutura das partículas que colidem desempenham um papel fundamental na formação dos há-

drons charmosos.

Em relação à desintegração do charme, nosso grupo tem atuado em pelo menos cinco linhas diferentes. São elas: mistura entre famílias de quarks nas interações fracas; comprovação de propriedades da teoria das forças fracas através de interações mediadas pela partícula  $Z^0$ ; discussão teórica e experimental da desintegração do charme em três partículas; assimetria entre a formação de matéria e antimatéria (ou violação CP).

Porém, um resultado obtido também na linha de desintegração do charme é de particular importância para a física de partículas. Publicado recentemente na prestigiosa *Physical Review Letters* (vol. 86, p. 770, 2001), o artigo relata a comprovação da existência do méson  $s$  (sigma), partícula prevista teoricamente no início da década de 1960, mas que, até agora, havia se mostrado fugidia. Com a mesma técnica que levou à observação do méson sigma (500) –



Sentados (esq. para dir.): João dos Anjos, Jussara M. de Miranda e Alberto Correa dos Reis; em pé (esq. para dir.): Javier Magnin, André Massafferri, Ignácio Bediaga & Hickman e Cecília Uribe.

o número indica sua massa em MeV –, foi possível ainda observar outra partícula procurada há anos, o méson  $k$  (kappa), bem como aprimorar a compreensão sobre o méson  $f_0$  (980).

Vale ressaltar que as propriedades do méson sigma fazem dele uma partícula complementar ao méson  $\pi$  (pi), que foi descoberto em 1947 com a participação do físico brasileiro Cesar Lattes, fundador e primeiro diretor científico do CBPF. Assim, cinco décadas mais tarde, a história retorna à mesma instituição para, de certo modo, completar um ciclo de descobertas.

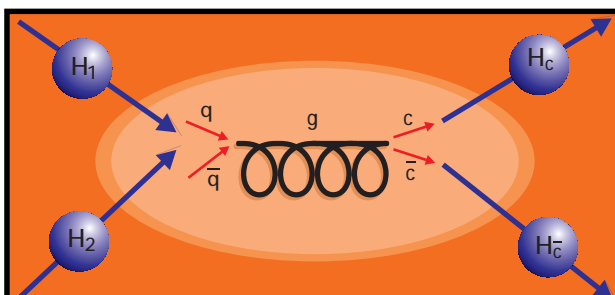


Figura 4. Processo típico de produção de hádrons pesados. No diagrama, os hádrons iniciais ( $H_1$  e  $H_2$ ) destroem-se na colisão e produzem um par *charm-anticharm* ( $c$  e  $\bar{c}$ ), que posteriormente forma dois hádrons pesados charmosos, um dotado de um quark *charm* ( $H_c$ ) e outro de um *anticharm* ( $H_{\bar{c}}$ ). A letra  $g$  representa um glúon (partícula mediadora da chamada força forte).

mado processo de hadronização, que é o modo como os quarks *charm* se recombinam com os quarks leves liberados na colisão formando os hádrons charmosos (figura 4).

**FENOMENOLOGIA RICA.** Enquanto o estudo da produção dos hádrons charmosos tem ajudado a aprofundar o conhecimento sobre como a matéria interage através da força forte, a desintegração dessas partículas tem permitido testar de modo rigoroso um dos maiores desenvolvimentos teóricos do século 20: teoria eletrofraca, na qual estão unificadas duas forças fundamentais da natureza, a eletromagnética e a fraca.

Além de ser capaz de realizar testes refinados para os modelos atuais de partículas, a física dos hádrons charmosos tem se mostrado frutífera também na observação experimental de partículas. É essa fenomenologia particularmente rica que faz dessa área uma das mais ativas e promissoras dentro do campo da física de partículas. ■

COLABORADORES

Dalber Ruben Sanchez Candela (doutor)  
Jorge Elias Musa Carballo (doutor)  
Jorge Luiz Gonzalez (doutor)  
Ana D. Alvarenga (doutora)  
Maria da Penha Cindra Fonseca (doutora)  
Edson Passamani (pesquisador visitante)  
Li-Yang (pesquisador visitante)  
Sergio Garcia Garcia (pesquisador visitante)  
Julio Antonio Larrea Jiménez (doutorando)  
Ada Petronila Lopez (doutoranda)  
Marcos Morales (doutorando)  
Armando Biondo (doutorando)  
Pablo E. Munayco Solorzano (mestrando)  
Mariella Camarena (mestranda)  
Alexandre Mello (engenheiro)  
Eduardo S. Yague (engenheiro)  
Wilson Vanoni (físico)  
Henrique Duarte (técnico)  
Ivanildo de Oliveira (técnico)  
Walmir F. de Mendonça (técnico)  
Vicente Cunha (vidreiro)  
Fernando L. Stavale Jr. (iniciação científica)  
André França de Souza (iniciação científica)  
Jean-Philippe Dockier (iniciação científica)  
Henrique Duarte da Fonseca (iniciação científica)  
Júlio Alberto Guanabara Balociam (iniciação científica)

# O impacto dos materiais avançados

**A pesquisa na área de materiais tem sido importante elemento no desenvolvimento das sociedades modernas, fundadas na alta tecnologia. O impacto de materiais avançados, como ligas metálicas, semicondutores, filmes finos, cerâmicas, cristais líquidos e supercondutores, atinge todos os aspectos do mundo moderno, do nosso dia-a-dia à grande escala da economia mundial.**

**Salto para novas tecnologias** envolvendo materiais sempre tiveram uma ligação estreita tanto com a pesquisa fundamental sobre as propriedades básicas da matéria em estado sólido – ou matéria condensada, como preferem os físicos – quanto com a pesquisa aplicada, que visa manipular as propriedades estruturais, físicas, químicas, elétricas, magnéticas, entre outras, da matéria.

Um dos objetivos da pesquisa na área da física da matéria condensada é desenvolver materiais cuja estrutura deve ser definida com precisão, em nível atômico, para dotá-los de propriedade e comportamento específicos para determinadas aplicações. Essa tarefa depende mais e mais da atuação conjunta de técnicas sofisticadas que vão da preparação e da caracterização ao entendimento teórico desses novos materiais.

>>>

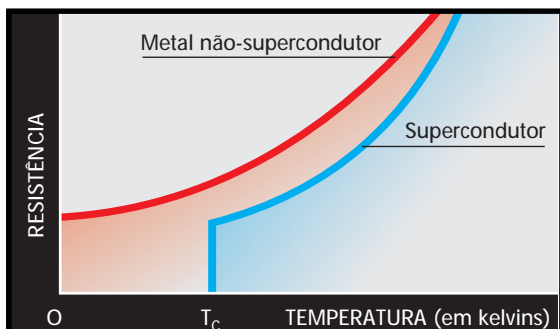


Figura 1. Comparação da variação da resistência elétrica segundo a variação de temperatura para um supercondutor e um metal normal.  $T_c$  é a chamada temperatura crítica, abaixo da qual a resistência elétrica em um supercondutor é nula.

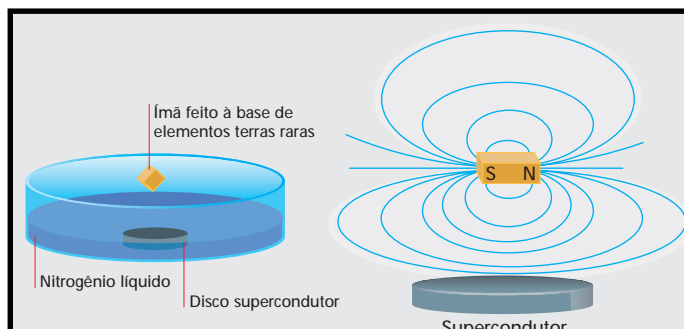


Figura 2. O ímã induz no material supercondutor correntes elétricas que, por sua vez, geram um campo magnético em seu interior. O campo magnético criado no ímã faz com que os dois materiais se repilam, fenômeno conhecido pelo nome de efeito Meissner. Para evitar, a força de repulsão deve ser igual ao peso do ímã.

Importantes linhas de pesquisa de ponta em materiais avançados estão presentes no CBPF, com um interesse voltado para as propriedades físicas e potencialidades tecnológicas desses materiais. Nossa capacidade instalada na área de física da matéria condensada, iniciada na década de 1970 pelo físico e químico brasileiro Jacques Danon (1924-1989), tem uma posição de destaque tanto no cenário brasileiro quanto internacional.

Passaremos agora a detalhar um pouco mais as áreas a que se dedica o Grupo de Materiais Avançados do CBPF.

**I. SUPERCONDUTORES.** O fenômeno da supercondutividade foi descoberto por Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926), em 1911, em Leiden (Holanda). Estudando as propriedades elétricas dos metais a temperaturas muito baixas, próximas do zero

absoluto (273 graus celsius negativos), esse físico holandês descobriu que a resistência elétrica se tornava nula no mercúrio (Hg) resfriado a 269,2 graus celsius negativos. Ele entendeu que o metal passava, abaixo de uma certa temperatura (temperatura crítica ou simplesmente  $T_c$ ), para um novo estado, que chamou estado supercondutor, com base no surgimento de propriedades elétricas extraordinárias (figura 1).

Onnes, que recebeu o prêmio Nobel em 1913, tinha consciência da importância de sua descoberta para a ciência, bem como de seu potencial comercial. Um condutor elétrico sem resistência pode conduzir sem perdas corrente elétrica a grandes distâncias. Onnes, por exemplo, manteve uma corrente circulando em um fio de chumbo (Pb), resfriado a 4 kelvin (269 graus celsius negativos) durante um ano! Batizou essa corrente 'per-

## GRUPO ORGANIZARÁ ENCONTRO MAIS IMPORTANTE DA ÁREA

No CBPF, o estudo da supercondutividade não é novidade. Há mais de uma década, seus pesquisadores têm contribuído para entender as propriedades desses materiais.

Os trabalhos realizados no Laboratório de Supercondutividade do CBPF têm uma abordagem bem abrangente, cobrindo desde a preparação dos materiais (caracterização estrutural, magnética e supercondutora) até a busca do entendimento dos mecanismos envolvidos, variando alguns parâmetros (composição, temperatura e pressão) de forma controlada.

Nosso programa de trabalho objetiva estudar: a) a relação do estado supercondutor com as propriedades magnéticas e estruturais desses mate-

riais; b) os efeitos de pressão hidrostática sobre a temperatura crítica ( $T_c$ ), bem como sobre as propriedades de transporte, os efeitos de dissipação e as correntes críticas; c) efeito das substituições atômicas nas diversas propriedades; d) relação das propriedades com a microestrutura desses materiais; e) coexistência de magnetismo e supercondutividade.

Trabalhamos com várias cerâmicas supercondutoras e também com os compostos da família dos boros-carbetos de terras raras – um exemplo desses composto é o  $RNi_2B_2C$ , que contém nióbio (Ni), boro (B) e carbono (C), sendo que R representa um elemento terra rara).

Estamos também iniciando estudos dos férmions pesados supercondutores do tipo  $CeRhIn_5$ , formado pelos elemen-

tos químicos cério (Ce), ródio (Rh) e índio (In). Nessa área, realizamos estudos no sentido de acompanhar as modificações do estado fundamental desses materiais, induzidas por perturbações físicas e químicas controladas e direcionadas.

A comunidade internacional atribuiu ao nosso grupo a responsabilidade de organizar no Brasil, em 2003, a próxima M2S-HTS (*International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors*), que é a conferência trianual mais importante na área de supercondutividade e faz parte de uma série de eventos iniciados em 1988 em Interlaken (Suíça).

sistente', pois ela circulava sem a aplicação de uma voltagem (ou, tecnicamente, diferença de potencial).

**ENVIADA AO ESPAÇO.** Desde então, esse fenômeno tem fascinado os cientistas, que conseguiram enormes progressos ao descobrir novos materiais supercondutores, aprofundando a compreensão dos mecanismos físicos responsáveis por esse novo estado, bem como concebendo aplicações tecnológicas dessa extraordinária propriedade (ver também nesta edição 'A supercondutividade').

Em janeiro de 1987, a área da supercondutividade passou por uma verdadeira revolução: a descoberta da supercondutividade acima da temperatura de liquefação do nitrogênio (77 kelvin, ou 196 graus celsius negativos), por Paul Chu e colaboradores, o que abriu enormes perspectivas para a aplicação prática desse fenômeno.

O impacto dessa descoberta pode ser estimado pelo fato de uma pastilha de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  ter sido enviada ao espaço em uma cápsula como uma das 100 maiores descobertas do último milênio. Formado pelos elementos químicos ítrio (Y), bário (Ba), cobre (Cu) e oxigênio (O), esse material é hoje o mais estudado entre os novos supercondutores a alta temperatura.

**LEVITAÇÃO MAGNÉTICA.** A propriedade que distingue um supercondutor (SC) de um condutor perfeito é o diamagnetismo, que impede que as linhas de força de um campo magnético penetrem no material. Essa propriedade, conhecida como efeito Meissner – em homenagem ao físico alemão Walther Meissner (1882-1974) –, dá origem a um dos fenômenos mais intrigantes relacionados à supercondutividade: a levitação magnética (figura 2).

O estado supercondutor pode ser destruído de três modos: a) elevando a temperatura do material acima da temperatura crítica ( $T_c$ ); b) aplicando uma corrente elétrica maior que a corrente crítica ( $I_c$ ); c) sujeitando o material a um campo magnético acima do valor crítico ( $B_c$ ). Esses fatores têm um papel importante quando se trata de construir dispositivos para aplicações.

**ALTAS TEMPERATURAS.** Em 1986, no Laboratório de Pesquisa da IBM, em Rüschlikon (Suíça), os pesquisadores Alex Müller e Georg Bednorz descobriram um composto cerâmico cuja temperatura de transição supercondutora jamais havia sido observada: 30 kelvin (243 graus celsius negativos). Assim, eles inauguravam a era dos supercondutores  $\text{HT}_c$  (sigla, em inglês, para supercondutividade a altas temperaturas).

O composto, tipo perovskita, formado pelos elementos químicos lantânio, bário, cobre e oxigênio –  $(\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x)\text{CuO}_4$  –, serviu para que ambos ganhassem o prêmio Nobel de 1987. Os aspectos importantes são o aumento da  $T_c$ , bem como o fato de se tratar de um óxido. Ainda em 1987, com a substituição do lantânio pelo ítrio (Y), o valor de  $T_c$  foi para 92 kelvin (181 graus celsius abaixo de zero).

Pela primeira vez na história da supercondutividade, um grupo de pesquisas conseguia um material com  $T_c$  acima do ni-

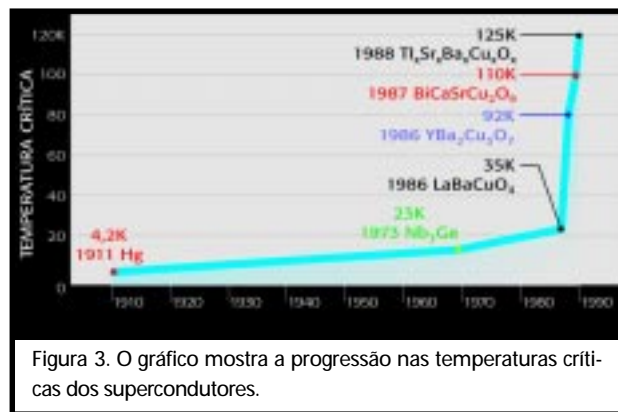


Figura 3. O gráfico mostra a progressão nas temperaturas críticas dos supercondutores.

EXTRAÍDO DE [HTTP://SUPERCONDUCTORS.ORG/LINKS.HTM](http://superconductors.org/links.htm)

trogênio líquido (77 kelvin), abrindo perspectivas enormes para a aplicação desses materiais, pois a refrigeração por nitrogênio líquido é relativamente barata em comparação com o hélio líquido, elemento caro e pouco abundante.

Mais tarde, foram descobertos outros materiais cerâmicos cuja temperatura era superior aos 92 kelvin. Hoje, o recorde, a pressão ambiente, é de 135 kelvin (138 graus celsius negativos) para um composto formado por mercúrio, tálio, bário, cálcio, cobre e oxigênio (figura 3).

**FORMANDO PARES.** Um SC tem a capacidade de conduzir corrente elétrica sem dissipação de energia, o que não acontece com um condutor comum. Em metais como cobre e alumínio, a corrente flui quando elétrons migram de um íon para outro, colidindo com impurezas ou imperfeições na estrutura (ou rede cristalina) desses materiais. Nesse caso, os choques fazem com que os elétrons sejam espalhados em todas as direções, perdendo com isso energia na forma de calor (figura 4a).

Em comparação com um condutor convencional, o movimento dos elétrons em um SC é muito diferente. Vibrações atômicas são responsáveis por unificar a corrente total, forçando os elétrons a se agruparem em pares (os chamados pares de Cooper). Assim, elétrons, que normalmente se repelem, passam a 'sentir' uma atração profunda em um SC (figura 4b). Em pares, eles passam então a se comportar como se fossem uma partícula única. Nesse estado, ao percorrer a rede cristalina do condutor, eles são capazes de superar todos os obstáculos que causam a resistência.

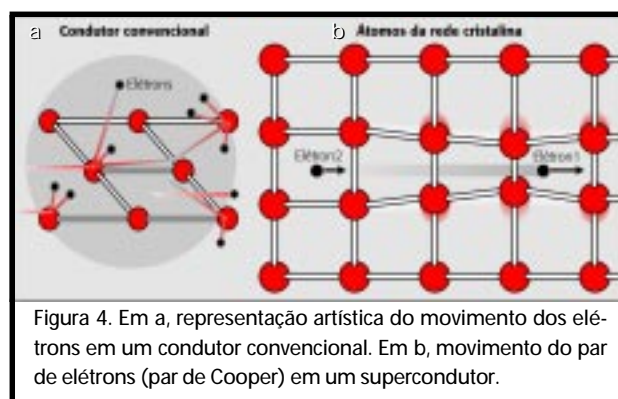


Figura 4. Em a, representação artística do movimento dos elétrons em um condutor convencional. Em b, movimento do par de elétrons (par de Cooper) em um supercondutor.

>>>

**MECANISMO CONTROVERSO.** A busca de mecanismos responsáveis pela supercondutividade a altas temperaturas ainda permanece um dos problemas mais relevantes na física da matéria condensada.

Estudos do efeito de altas pressões sobre a temperatura crítica de cerâmicas supercondutoras permitem definir as substituições de um elemento químico por outro que possam aumentar ainda mais os valores dessa temperatura e proporcionar um melhor entendimento dos aspectos básicos dos materiais de HT<sub>c</sub>.

O mecanismo por trás da formação dos pares de Cooper é ainda controverso para explicar a supercondutividade nos cupratos (compostos de óxido de cobre).

**NOVAS IDÉIAS.** Os novos supercondutores a alta temperatura, como o  $\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$ , violam os limites previstos pela teoria BCS, batizada assim em homenagem aos seus idealizadores, os físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991), Leon Cooper e John Schrieffer, que ganharam o Nobel de 1972 por esse trabalho.

Teóricos, como o físico norte-americano Philip Anderson, da Universidade de Princeton, em Nova Jersey (Estados Unidos) e premio Nobel de 1977, estão buscando teorias que incluam novas interpretações. Entre elas, está, por exemplo, a possibilidade de formação de pares de Cooper também por interação magnética – na teoria convencional, essa interação é elétrica.

Uma parte da informação para entender a supercondutividade a altas temperaturas está no comportamento de um SC durante seu estado não supercondutor: o material mostra propriedades elétricas e magnéticas diferentes daquelas encontradas nos condutores convencionais.

Uma vez entendida a base do mecanismo nesses materiais, valores mais altos da temperatura crítica podem ser atingidos.

**FITAS E FIOS.** Em um mundo preocupado com formas limpas e econômicas de energia, bem como com seu armazenamento e

## COLABORAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS

O Grupo de Materiais Avançados do CBPF mantém colaboração na área experimental com a Universidade Técnica de Braunschweig e a Universidade Técnica de Colônia, ambas na Alemanha, e com a Universidade de Havana (Cuba).

Além disso, mantemos colaborações com diversos grupos em países como Estados Unidos, China, França, Polônia, Espanha, Peru, Índia, Marrocos e Coreia do Sul

Também importante para o sucesso dos nossos trabalhos são as colaborações com pesquisadores teóricos da Universidade Federal Fluminense e com experimentais da Universidade Federal do Espírito Santo e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

EXTRAÍDO DE HTTP://WWW.IAMSUPER.COM/

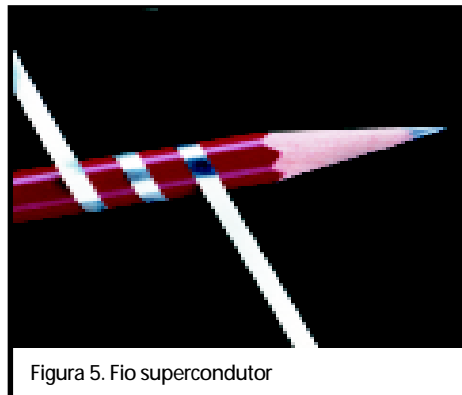


Figura 5. Fio supercondutor

sua transmissão através de longas distâncias, o estudo da supercondutividade adquire cada vez mais relevância. Por outro lado, a descoberta de novos materiais, a caracterização e o aperfeiçoamento daqueles já conhecidos, juntamente com as formas de utilização e questões teóricas, são um desafio e estímulo para o estabelecimento de novas parcerias entre ci-

ência básica, desenvolvimento e indústria.

Temperaturas críticas supercondutoras próximas àquela do nitrogênio líquido também criaram uma nova perspectiva para aplicações tecnológicas que podem ocorrer nas áreas de energia elétrica e da construção de ímãs para campos magnéticos intensos, bem como de eletromotores e sensores.

Fitas e fios supercondutores feitos de supercondutores HTc tornaram-se tema de grande interesse em todo o mundo devido às suas altas correntes críticas, pois essa característica permite visualizar importantes aplicações tecnológicas que talvez tragam ao nosso dia-a-dia progressos tão importantes quanto os causados pela tecnologia baseada nos semicondutores.

**O FUTURO ESTÁ CHEGANDO.** Já existem aplicações importantes de cerâmicas supercondutoras na geração, no armazenamento e na transmissão eficiente de energia. Elas também têm sido usadas na detecção de pequenos sinais eletromagnéticos e no desenvolvimento de tecnologia mais rápida e compacta para a telefonia celular.

Já sendo comercializados, os chamados SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*), sensores de campo magnético com muito baixa intensidade que podem funcionar tanto refrigerados por nitrogênio líquido quanto hélio líquido (4,2 kelvin), empregam cerâmicas supercondutoras. Cabos flexíveis supercondutores também já são realidade. Por exemplo, a empresa *American Superconductor* está usando supercondutores para fazer cabos multifilamentares de vários quilômetros de extensão.

Para breve, espera-se a aplicação de supercondutores na construção de trens velozes que usariam o princípio da levitação magnética, bem como de computadores super-rápidos. Vislumbra-se também o uso desses materiais nas áreas de comunicação por microondas (filtros e antenas); telecomunicações (estações de telefonia celular); tecnologia militar (filtro para sinais de radares); energia (emprego de cabos supercondutores que diminuiriam as perdas em torno de 15%); pesquisa espacial (dispositivos à base de materiais HTc); computação (máquinas com interface para semicondutores e supercondutores); medicina (SQUIDS milimétricos para a detecção de sinais magnéticos do coração e do cérebro).

**II. FÉRMIONS PESADOS.** Férmions pesados são compostos metálicos que, abaixo da temperatura do hélio líquido (4,2 kelvin ou 269 graus celsius negativos), apresentam propriedades físicas que revelam um aumento excessivo da massa efetiva dos elétrons de condução. Nos condutores convencionais, como fios de cobre, por exemplo, os elétrons de condução são os responsáveis pela corrente elétrica.

Férmions pesados são formados por um elemento magnético com camada eletrônica incompleta – em geral, a camada  $f$  – que pode ser uma terra rara (cério ou itérbio) ou um actínido (urânio ou tório) e um metal de transição (por exemplo, ferro, cobalto, níquel, cobre, entre outros). Algumas vezes, um férmion pesado pode conter também em sua composição germânio ou silício.

**PROPRIEDADES EXÓTICAS.** As propriedades físicas em baixas temperaturas são governadas pela competição entre duas interações principais: a interação magnética entre os elementos magnéticos, bem como pela interação elétrica exercida pelos elétrons de condução sobre os elétrons da camada incompleta dos elementos magnéticos. A interação magnética atua de forma a tornar o material magnético – em geral, com ordem tipo antiferromagnética –, enquanto a interação elétrica tende a cancelar o magnetismo.

Como consequência da competição entre essas duas interações, os férmions pesados podem assumir diferentes estados fundamentais, com propriedades físicas exóticas que diferem muito do comportamento normal observado nos metais comuns. Alguns férmions pesados apresentam transição supercondutora, como é o caso do  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  e  $\text{UBe}_{13}$ , e, em alguns casos, a supercondutividade pode até mesmo coexistir com uma ordem magnética, como ocorre para o  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ .

Em alguns compostos férmions pesados, ocorre um efeito especial em temperaturas abaixo da temperatura de hélio líquido (4,2 kelvin), que é o comportamento linear da resistividade em função da temperatura – a curva resistência *versus* temperatura é um reta. Esse comportamento não ocorre nos metais comuns, onde a resistividade tem uma dependência quadrática em baixas temperaturas – a curva se assemelha a uma meia parábola.

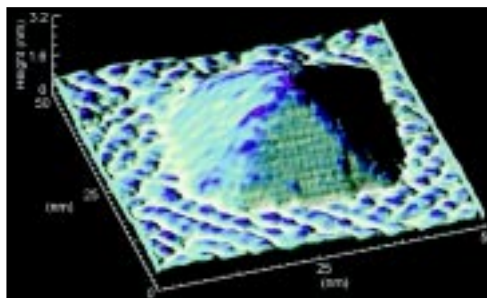
EXTRAÍDO DE [HTTP://WWW.NSF.GOV/NANO/](http://www.nsf.gov/nano/)

Figura 6. Pirâmide feita de átomos de germânio formada espontaneamente sobre uma base de silício. Esse tipo de técnica poderá ajudar no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos extremamente pequenos.

mions pesados, o elemento magnético faz parte da rede.

Apesar do grande esforço teórico e experimental que tem sido dedicado por pesquisadores de todo o mundo, ainda falta o entendimento mais profundo das propriedades desses materiais.

Esse tema de estudo de física básica visa ao entendimento de fenômenos que são introduzidos com a descoberta de novos materiais com propriedades físicas incomuns. O acúmulo desses conhecimentos pode levar à descoberta de uma aplicação prática para os férmions pesados ou para os conceitos neles envolvidos.

**III. FILMES FINOS.** Nanociência e nanotecnologia são áreas emergentes que estão levando a um conhecimento e controle sem precedentes dos blocos constituintes da matéria. É o mundo funcionando em escalas dos nanômetros (ou bilionésimos de metro), tamanhos compatíveis com os de moléculas ou de átomos enfileirados.

Dois abordagens têm sido usadas com sucesso na produção de amostras nanoestruturadas: a) técnicas de litografia e máscaras, que permitem criar nanoestruturas que se estendem sobre grandes áreas da amostra; b) crescimento de nanoestruturas através de auto-organização de átomos e moléculas depositados sobre uma superfície (substrato).

**ÁTOMOS MANIPULADOS.** O modo pelo qual átomos e moléculas se organizam, em padrões de várias formas e superfícies em escala nanoscópica, determina propriedades importantes dos materiais, como condutividade elétrica, propriedades ópticas e mecânicas. A manipulação controlada de materiais nessa escala resulta em dispositivos com várias aplicações tecnológicas.

Com um computador e um microscópio de tunelamento – este último construído em 1981 por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, pesquisadores da empresa IBM, em Zurique >>>

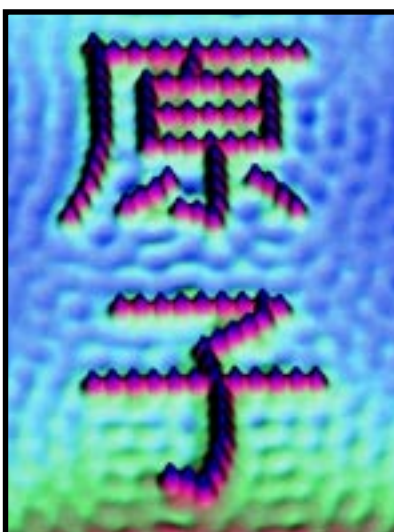
EXTRAÍDO DE [HTTP://WWW.NSF.GOV/NANO/](http://www.nsf.gov/nano/)

Figura 7. Palavra 'átomo', escrita no alfabeto japonês de Kanji, feita com o deslocamento de átomos. Essa técnica permitiria escrever as 25 mil páginas da edição de 1959 da *Enciclopédia Britannica* em um apenas um ponto (*pin head*).

(Suiça) –, é possível obter imagens extremamente aumentadas das topologias atômicas (figuras 6 e 7) – ver também nesta edição 'Microscopia do novo milênio':

Dentre os vários dispositivos para aplicação, estão os direcionados à gravação magnética em computadores. Nesse tipo de gravação, por exemplo, as informações são 'escritas' por uma cabeça de gravação magnética e 'lidas' por um dispositivo de leitura magnético no disco rígido, este também constituído por materiais magnéticos e para o qual se pesquisa o aumento da capacidade de armazenamento de informação em um espaço cada vez menor.

**SPINTRÔNICA.** Nessa área de manipulação de materiais metálicos em escala nanoscópica, o futuro aponta na direção do surgimento de uma nova era: a spintrônica, eletrônica baseada



Sentados (esq. para dir.): Henrique Duarte da Fonseca, Elisa Saitovitch, Magda Bittencourt Fontes e colaboradores.

no spin do elétron, uma propriedade que pode ser, grosso modo, associada à rotação do elétron em torno de seu eixo.

A capacidade de distinguir entre elétrons com spins opostos (rotação em sentido horário e anti-horário) é a chave para abrir as portas para uma nova geração de dispositivos eletrônicos, cuja operação se baseia na manipulação de famílias independentes desses portadores de corrente. ■

## TÉCNICA AVANÇADA PRODUZ FILMES DE ALTA QUALIDADE

No Laboratório de Filmes Finos do CBPF, são produzidos diversos tipos de filmes na forma de ligas (co-deposição), monocamadas e multicamadas. O interesse é entender desde o comportamento de uma impureza magnética em metais magnéticos e não magnéticos até os mecanismos que regem as interações entre as multicamadas, de modo a aplicar esses resultados no planejamento de dispositivos tecnológicos.

Esses dispositivos são constituídos por camadas finas superpostas – com espessura da ordem de poucos nanômetros (bilionésimos de metro) – de metais com propriedades magnéticas diferentes, em uma combinação que resulta nos efeitos desejados. São os filmes finos e multicamadas magnéticas (figura 8).

Duas técnicas de fabricação de filmes finos e multicamadas metálicas estão em uso no CBPF: a) evaporação em ultra-alto vácuo; b) deposição por *magnetron sputtering*.

Na evaporação em ultra-alto vácuo, o material é depositado em uma superfície (substrato) a uma baixa taxa de deposição, geralmente menor do que uma camada de átomos por segundo. Isso resulta em um filme controlado camada a camada. Devido ao ultra-alto vácuo dentro da câmara de deposição, é

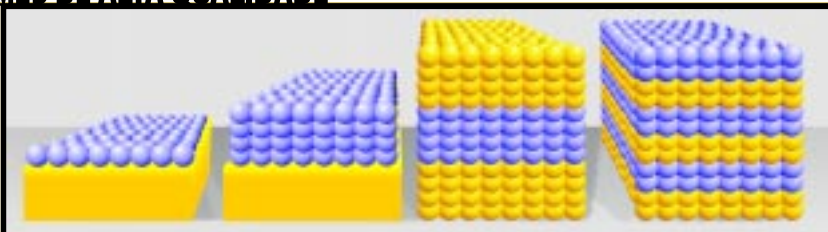


Figura 8. Representação das mono, bi, tri e multicamadas preparadas por deposição de dois metais. Nas duas primeiras, a parte amarela representa o substrato.

possível usar técnicas sofisticadas de caracterização, do tipo LEEDS e Auger, que envolvem a detecção de elétrons.

Alguns investimentos ainda são necessários para poder trabalhar em sistemas ligados à área de spintrônica, bem como estudar a topologia da superfície de filmes ou fazer manipulações em nível atômico.

O *magnetron sputtering* é uma técnica de deposição de materiais com taxas de deposição da ordem de 0,1 nanômetro por segundo. A técnica arranca átomos de um material (alvo) que se quer depositar sobre um substrato. Isso é feito através da formação de um de 'gás' do elemento argônio a altíssimas temperaturas – na verdade, não se trata de um gás, mas sim de um estado da matéria, denominado plasma, em que as partículas, devido à elevada temperatura, estão dissociadas. Todo esse processo ocorre em uma câmara de ultra-alto vácuo.

Apesar de permitir um bom controle

da taxas de deposição, a presença dos gases de *'sputtering'* exclui a possibilidade de se analisarem as estruturas dentro da câmara onde acontece o crescimento do filme. Em nossos laboratórios, já foram obtidas multicamadas que apresentam magnetorresistência gigante (fenômeno em que a resistência elétrica aumenta muito na presença de um campo magnético) – ver nesta edição 'Fenômenos e materiais magnéticos'.

Esse sistema de deposição por *magnetron sputtering* foi instalado recentemente e, pela alta qualidade dos filmes obtidos, deverá atrair o interesse da comunidade brasileira de pesquisadores dessa área.

A composição dos filmes finos – principalmente, na forma de multicamadas – é caracterizada através de vários métodos de análise, entre elas difração por raios X, magnetorresistência, magnetização, espectroscopia Mössbauer e ressonância ferromagnética.

COLABORADORES

pesquisadores visitantes  
e bolsistas de pós-doutorado,  
doutorado, mestrado  
e iniciação científica

# O vocabulário das partículas elementares

Para descrever uma partícula elementar, vários conceitos e métodos teóricos tiveram que ser desenvolvidos. Com eles, tentamos entender uma nova e estranha realidade na qual as partículas se transformam de matéria em energia e vice-versa.

**Uma partícula** é uma entidade caracterizada por um conjunto limitado de propriedades. A escolha dessas propriedades é feita tendo como critério as simetrias satisfeitas pelas interações da partícula.

Existem algumas simetrias que podem ser consideradas fundamentais, dada a relação íntima que elas guardam com as nossas próprias percepções de espaço e de tempo. Uma delas é a simetria em relação à escolha de um ponto a partir do qual podemos começar a medir distâncias no espaço vazio. Podemos também escolher qualquer instante para começar a contar o tempo – quando não está acontecendo nada –, assim como qualquer direção do espaço (vazio).

Também sabemos que não podemos distinguir entre repouso e movimento com velocidade constante – lembremo-nos da experiência de estar em um trem, observando outro trem paralelo ao nosso em movimento.

Em particular, sabemos que, como consequência da existência das simetrias acima, deve existir uma série de quantidades que mantêm o seu valor inalterado à medida que o tempo passa. Podemos citar alguns exemplos: a conservação da energia é consequência da si- >>>



Figura 1. Uma partícula elementar caracteriza-se pelo conteúdo de cada ‘cesta’ (por exemplo, dentro da cesta ‘energia’, a partícula tem um total de duas unidades básicas de energia), que reflete os diferentes valores que essas grandezas podem tomar. Os conteúdos das cestas podem mudar durante interações entre as partículas, sempre conservando a quantidade total da grandeza em questão.

metria por escolha da origem do tempo; a conservação do momentum linear – também chamado quantidade de movimento, numericamente equivalente ao produto da massa pela velocidade da partícula – é consequência da simetria por escolha da origem das coordenadas no espaço. E assim por diante.

**LISTA DE PROPRIEDADES.** Essas simetrias mostraram-se tão exatas no contexto do mundo macroscópico que tornaram a sua extrapolação natural para o contexto microscópico (ou subatômico), em que a natureza das observações é certamente muito mais indireta.

No nível microscópico, freqüentemente ocorre de a medida de uma grandeza interferir, de modo incontornável, na medida de outra. Por exemplo, posição e velocidade de uma partícula não podem ser conhecidas simultaneamente com precisão arbitrária. Aqui aparece o papel das constantes de movimento: existe um conjunto máximo de informações sobre um sistema que pode ser conhecido simultaneamente de modo exato.

Conhecer os valores tomados pelas constantes de movimento compatíveis entre si – ou seja, cujas medidas não se interferem mutuamente – é dizer o máximo possível sobre a partícula em um dado instante de tempo. Do ponto de vista físico, o que resta a ser dito é como duas ou mais partículas, descritas por essa lista de propriedades, interagem entre si (figura 1).

**SEQÜÊNCIA DE FOTOGRAFIAS.** Os tipos de interação existentes entre as partículas determinam, de modo fundamental, a maneira pela qual a evolução se dá. Afinal, a física é a ciência da mudança. Se todas as coisas permanecessem estáticas e imutáveis o tempo todo, não haveria necessidade da física – nem da ciência, de uma forma geral.

Percebemos o mundo através da percepção de suas mudanças, sem o que nenhum tipo de conhecimento seria possível. A pretensão da física é prever, a partir de uma ‘fotografia’ (descrição) do sistema, produzida em um certo tempo, qual a seqüência de ‘fotografias’ irá se suceder. Em outras palavras, prever a mudança.

Na física, vista do ponto de vista microscópico, a informação máxima contida na ‘fotografia’ é obtida através de uma função matemática, denominada função de onda. Essa função, que contém toda a informação possível de ser obtida sobre o sistema em um dado tempo  $t$ , muda continuamente à medida que o tempo passa.

Teoricamente, é possível prever a mudança da função de onda através de um conhecimento da energia associada ao sistema. Nada mais razoável, se nos lembrarmos da conexão, vista acima, entre energia e simetria por translações temporais – estas podem ser traduzidas também como mudanças no tempo. Mostra-se que o problema de determinar a forma teórica da energia, como função dos parâmetros que caracterizam as partículas, reduz-se à determinação da energia de interação entre as partículas, que chamamos de  $V$ . Essa interação  $V$  deve respeitar todas as simetrias que ajudam a caracterizar as partículas (figura 2).

**TAREFA DAS MAIS COMPLEXAS.** Em muitos aspectos, a descrição atual das partículas elementares ainda é incompleta e insatisfatória para muitos físicos. Há um número excessivo de parâmetros – dos quais não se conhece a origem – no modelo teórico correspondente às interações (ou forças) eletromagnética, fraca e forte.

Também temos que apelar para mecanismos teóricos surpreendentes, como o mecanismo de geração de massa para as partículas  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , que intermedeiam as interações fracas. Ou mesmo mecanismos teóricos incompreendidos, como o que mantém os quarks e os glúons (partículas que interagem através da força nuclear forte) sempre confinados, ou seja, essas partículas nunca são observadas livres.

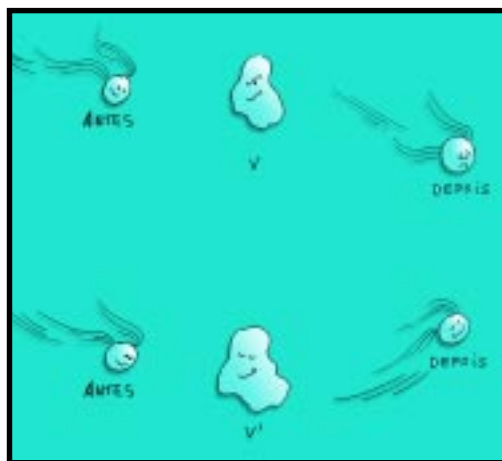


Figura 2. Colisões entre partículas têm seu resultado determinado pela forma específica da interação entre elas. Diferentes interações  $V$  produzem resultados de colisão diferentes.

Reduzir o número desses parâmetros e entender os mecanismos teóricos em ação nessas teorias é tarefa das mais complexas e que ocupa hoje inúmeros físicos em todo o mundo. Com a finalidade de reduzir a complexidade da pesquisa a níveis mais tratáveis, consideram-se diversos limites das teorias, em dimensões menores, por exemplo, ou com um conteúdo de partículas simplificado, em relação à situação realista.

**SUPERSIMETRIA E UMA NOVA FÍSICA.** O número de parâmetros tende também a ser reduzido se consideramos uma nova simetria, chamada supersimetria, que envolve trocas de partículas de spin inteiro (bósons) por partículas de spin semi-inteiro (férmions). Para uma melhor visualização, podemos associar a grandeza spin a um estado de rotação (horário ou anti-horário) das partículas. O interessante é que a supersimetria prevê a existência de uma vasta classe de partículas ainda não detectadas e ainda não produzidas (excitadas) nos aceleradores de altas energias. Esses novos constituintes da natureza podem ser uma grande porção daquilo a que, hoje, a física chama 'matéria escura' do universo.

Sléptons, squarks, charginos, neutralinos e gravitino são as partículas supersimétricas que, esperamos, poderão vir a ser descobertas em uma nova geração de aceleradores que está sendo construída – mais especificamente, esses aceleradores são o Novo Colisor de Léptons e o Grande Colisor de Hádrons.

**ALÉM DAS QUATRO DIMENSÕES.** A cosmologia do universo primordial propõe que essas partículas supersimétricas tenham sido produzidas no universo em seus primeiríssimos instantes

## LINHAS DE PESQUISA INCLUEM SUPERSIMETRIA E TEORIAS M

As linhas de pesquisa desenvolvidas atualmente no Grupo de Campos e Partículas do CBPF dizem respeito à análise das propriedades de teorias relacionadas às quatro interações (ou forças) da natureza.

Estudamos, particularmente, as diversas conseqüências dinâmicas da supersimetria. Dimensões diferentes de quatro também são interessantes, por possibilitarem soluções exatas em certos casos (duas dimensões); por exibirem fenômenos peculiares que podem ser aplicados em descrições efetivas (duas e três dimensões); ou por aparecerem em propostas de mistura da gravitação e da supersimetria (dez e 11 dimensões).

O estudo das chamadas teorias M, que incorporam cordas e membranas,

também está em curso atualmente em nosso grupo já dentro do contexto da unificação das três interações com a gravitação. Cabe ressaltar que as interações eletromagnética e nuclear fraca já foram enquadradas em um esquema unificador no final da década de 1960, naquele que hoje se conhece como o modelo eletrofraco de Weinberg-Salam-Glashow.

O leitor interessado em mais detalhes sobre os temas tratados neste artigo poderá encontrá-los em <http://www.aventuradasparticulas.ift.unesp.br/> (página sobre a física das partículas elementares em termos básicos), bem como em <http://www.cbpf.br/>, clicando no item 'Campos e Partículas' – neste último endereço, está o trabalho do nosso grupo.

Figura 3. Modernas teorias propõem que, quando observadas suficientemente de perto, as partículas elementares revelam-se com o sendo cordas ou mesmo membranas.



de existência, e que hoje possam ser encontradas como reliquias de um passado de cerca de 15 bilhões de anos em muitas das galáxias. Porém, há uma interação a ser entendida, mesmo que de modo parcial, como as outras: a gravitação. Esta, cuja forma foi a primeira a ser proposta classicamente, ainda no século 17, pelo físico e matemático inglês Isaac Newton (1642-1727), resiste ainda a uma descrição microscópica, que é denominada gravitação quântica.

Na tentativa de produzir essa descrição, têm sido consideradas teorias que descrevem, de modo unificado, todas as quatro interações conhecidas, ou seja, as forças eletromagnética, gravitacional, nuclear forte e nuclear fraca. As mais promissoras, até agora, envolvem uma modificação básica: considerar que as diversas partículas elementares, vistas em escalas de distância muito menores que as atualmente acessíveis, seriam diferentes aspectos de uma mesma entidade – no caso, uma corda ou uma membrana.

O acréscimo de dimensões a partículas que tinham dimensão zero introduz diversas possibilidades de novas interação entre as partículas, agora vistas como descrições efetivas das cordas ou membranas, em distâncias maiores. Entre as novas características que aparecem juntamente com essas teorias, está a possibilidade de o espaço-tempo ter dimensão dez (no caso, de cordas) ou mesmo onze (no caso, de membranas), seis ou sete a mais que as atuais (e visíveis) quatro dimensões (figura 3).

Finalizando, poderíamos concluir enfatizando que o grande compromisso – a busca do Graal – da física teórica de altas energias contemporânea é a formulação de modelos consistentes para as quatro interações fundamentais da natureza; se possível – e este tem sido o esforço maior – a elaboração de uma teoria da grande unificação consistente e que consiga abranger, em um esquema único, todas as escalas de energia, desde a escala atômica (aproximadamente  $10^{-8}\text{cm}$ ) à escala planckiana (da ordem de  $10^{-33}\text{cm}$ ).

# Laboratório de raios cósmicos

O estudo das interações produzidas pelos raios cósmicos, particularmente pelos de energia extremamente alta, tem servido como uma sonda para investigar o comportamento da matéria e de seus constituintes elementares.

**Descobertos no início do século 20**, os raios cósmicos são partículas que têm sua origem no espaço e que, ao penetrar a atmosfera terrestre, chocam-se contra núcleos atômicos, produzindo uma 'cascata' de partículas secundárias. A energia dessas colisões é, em geral, muitas ordens de grandeza superior às atingidas nos aceleradores de partículas hoje em atividade.

A comprovação experimental de muitas partículas previstas teoricamente deu-se através do estudo dessas colisões. O pósitron (antipartícula do elétron) foi descoberto em 1932 pelo físico norte-americano Carl Anderson (1905-1991), e, no ano seguinte, o físico inglês Patrick Blackett (1897-1974) e o italiano Giuseppe Occhialini (1907-1993) demonstraram experimentalmente o processo no qual um fóton (partícula de luz) se transforma – ou decai, como preferem os físicos – em um pósitron e um elétron. Quatro anos mais tarde, seria a vez do méson (hoje, denominado múon), partícula com propriedades semelhantes às do elétron, porém com massa superior.

Em todas essas descobertas, as emulsões nucleares desempenharam um papel destacado. Porém, uma dessas descobertas

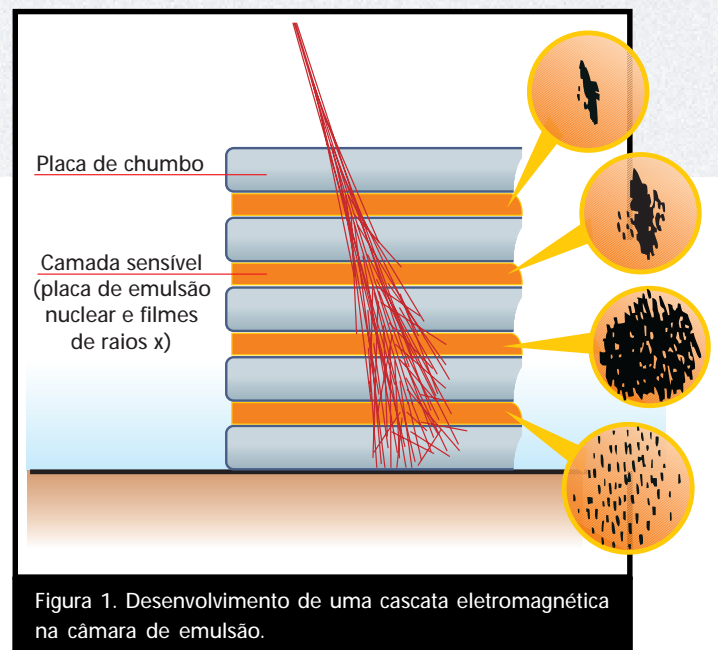


Figura 1. Desenvolvimento de uma cascata eletromagnética na câmara de emulsão.

teve – e tem ainda – um significado especial para o Brasil: a do méson pi em 1947, da qual participaram o físico brasileiro Cesar Lattes, bem como Occhialini e o inglês Cecil Powell (1903-1969), este último líder da equipe do Laboratório W. W. Wills, da Universidade de Bristol (Inglaterra). O méson pi (partícula responsável por manter o núcleo atômico coeso) confirmou as previsões teóricas de dois físicos japoneses, Hideki Yukawa (1907-1981), em 1935, e Shoichi Sakata, em 1942.

**MAIS CONTRIBUIÇÕES DO BRASIL.** Mesmo antes de Lattes, o Brasil já tinha tradição de pesquisa nessa área, para a qual contribuiu significativamente. Isso se deu primeiramente com os físicos brasileiros Marcello Damy de Souza Santos e Paulus Aulus Pompéia (1910-1993), liderados pelo italo-russo Gleb Wataghin (1899-1986), cujos experimentos conduziram à importante descoberta dos chamados chuveiros penetrantes em 1940 – essa descoberta está relacionada ao fato de as partículas penetrantes (no caso mésons) não poderem ser produzidas pela materialização de fótons na matéria – como é o caso de elétrons e pósitrons –, mas sim produzidas pelas interações nucleares de raios cósmicos com a mesma.

Quatro anos depois, Wataghin e outro físico brasileiro, Oscar Sala, mostraram que há produção de partículas em colisões de núcleons (prótons e nêutrons) com prótons. O resultado dessa descoberta é que a produção dos secundários não se dá somente em colisões sucessivas do raio cósmico (ou primário, na linguagem técnica) dentro do núcleo (produção plural), como muitos pensavam, mas sim em colisões individuais (produção múltipla). As partículas produzidas eram mésons pi (ou pions), porém eles não sabiam, porque essas partículas só seriam identificadas, como já dissemos, em 1947.

**DISPOSITIVOS NAS MONTANHAS.** As informações experimentais obtidas com raios cósmicos desenvolvem-se lentamente. E há duas razões básicas para isso: de um lado, o fluxo de raios cósmicos que chegam à Terra (ou primários) decresce rapidamente à medida que a energia dessas partículas aumenta, ou seja, quanto mais energético é o raio cósmico mais raro ele é. Aqueles com energias extremamente altas são eventos raríssimos: estima-se que cada quilômetro quadrado da superfície terrestre receba um deles por século! De outro, há o problema instrumental das técnicas de medidas para separar, identificar e medir a energia dos secundários de energia cada vez mais alta.

Juntamente com o desenvolvimento de métodos teóricos (analíticos e numéricos), vários experimentos realizados por grupos experimentais distribuídos por todo o mundo levaram à obtenção de informações confiáveis sobre as interações nucleares produzidas por raios cósmicos com energias até a região do

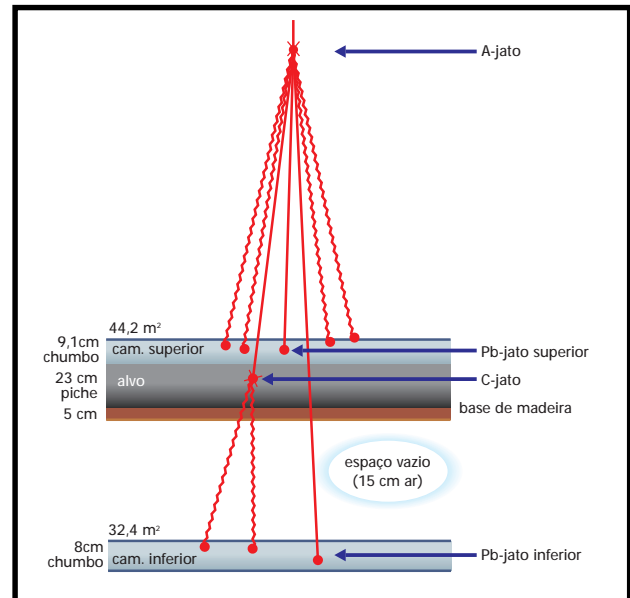


Figura 2. Câmara de dois andares com os três tipos de interações.

$10^{12}$ eV (ou trilhões de elétrons-volt). Acima desse patamar, os dados são obtidos através dos chamados EAS (sigla, em inglês, para chuveiros atmosféricos extensos). EAS nada mais é do que um grupo muito extenso de partículas resultantes de processos de cascatas na atmosfera terrestre (ver também nesta edição 'Energias extremas no universo').

Uma análise dos sucessos e das dificuldades anteriores, bem como a comparação com os resultados usando a técnica do EAS, conduziram à conclusão de que as observações deveriam envolver detectores com uma área sensível muito maior e tempos de exposição também maiores, o que levava inevitavelmente ao uso de dispositivos instalados em montanhas.

**OS CENTAUROS.** A comprovação experimental do méson pi por Lattes a partir das previsões teóricas feitas por Yukawa criou um vínculo de amizade entre a física brasileira e japonesa, na área de raios cósmicos. No entanto, as limitações em altitudes dos laboratórios nas montanhas disponíveis para os

## CÂMARAS DUPLAS USAM PICHE COMO ALVO

Desempenhando o papel de um detector, as câmaras de emulsões são formadas por vários blocos, cada um dos quais é constituído de placas de chumbo (1 cm de espessura), alternadas com envelopes contendo material fotossensível (filmes de raios X justapostos a placas de emulsões nucleares). Os blocos têm dimensões de 40 cm por 50 cm, sendo que a profundi-

dade das câmaras varia de uma para outra. Na figura 1, mostramos o desenvolvimento de uma cascata eletromagnética na câmara de emulsão.

Até a câmara de número 14 instalada pela Colaboração Brasil-Japão, de um total de 24, a geometria adotada era a de câmara simples, projetada para se estudar interações iniciadas acima das câmaras – essas interações levam o nome de

A-jatos. No entanto, com as posteriores, partiu-se para a construção das chamadas câmaras duplas (câmara superior, camada de alvo, espaço vazio e câmara inferior). O objetivo destas últimas é o de estudar interações ocorridas no chumbo e no alvo (piche) – denominadas, respectivamente,  $P_b$ -jatos e C-jatos. A figura 2 detalha esse tipo de câmara.

>>>

## LABORATÓRIO PREPARA TELESCÓPIO PARA MÚONS CÓSMICOS

Fundado no início da década de 1960, o Laboratório de Estudos de Raios Cós- micos é herdeiro de uma das primeiras e mais tradicionais linhas de pesquisa do CBPF.

Ao longo destas últimas quatro dé- cadas, nosso laboratório tem se dedica- do tanto à pesquisa experimental quan- to ao tratamento teórico dos dados co- letados nos experimentos. Em relação à Colaboração Brasil-Japão, estamos de- senvolvendo duas linhas de pesquisa. Uma delas diz respeito ao estudo de centauros, chirons, halos, entre outros eventos exóticos envolvendo raios cósmicos – em uma linguagem mais técnica, a principal característica desses eventos é a produção múltipla de hádrons (par- tículas que interagem através da força forte) sem a emissão concomitante de mésons pi (ou píons) neutros e, por conseguinte, a ausência de fótons.

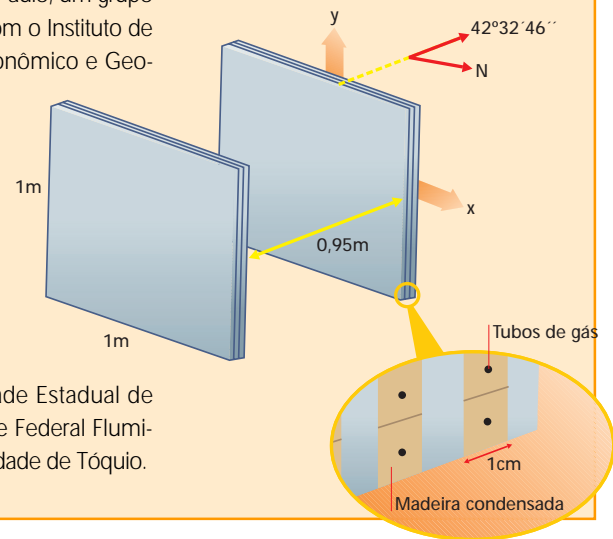
Também estamos neste momento interessados em certas propriedades (mais especificamente, a chamada dis- tribuição angular) do fenômeno que envolve a ‘transformação’ (decaimento) do pión em outras duas partículas, o múon (ou méson mi) e o elétron.

Na parte experimental, estamos fi- nalizando a construção de um telescópio para o estudo de múons cósmicos de baixa energia – a figura 3 traz deta- lhes desse equipamento. A inspiração para essa linha de pesquisa veio de ex- perimento similar realizado em 1987 pelo Laboratório Nacional de Frascati (Itália), que ganhou o nome Micro (si- gla, em inglês, para monitor para jatos intensos de raios cósmicos).

Nossa proposta é fazer experimento similar no hemisfério Sul – mais especi- ficamente, o Micro-Urca será instalado no Rio de Janeiro. Em São Paulo, um grupo do CBPF, juntamente com o Instituto de Física e o Instituto Astronômico e Geo- físico, ambos da Uni- versidade de São Paulo, montaram o Micro-Sul, cujos resultados ainda são esperados.

O Laboratório de Estudos de Raios Cós- micos do CBPF mantém colabora- ções com a Universidade Estadual de Campinas, Universidade Federal Flumi- nense e com a Universidade de Tóquio.

Figura 3. Detalhe do aparato experimental do detetor Micro para a detecção de múons cósmicos de baixa energia, que está em fase de finalização pelo Laboratório de Estudos de Raios Cós- micos do CBPF. Os múons para serem aceitos pela eletrônica de aquisição do equipamento devem, necessariamente, atravessar os dois setores do detetor, que estão separados, o que vai definir um ângulo de observação, constituindo, dessa forma, um telescópio.



cientistas daquele país levaram um grupo de físicos a pedir a intervenção de Yukawa junto a Lattes. O objetivo era propor uma colaboração envolvendo os estudos de raios cósmicos de altas energias a ser desenvolvido no monte Chacaltaya (5.220 metros de altitude), na Bolívia, local que Lattes já havia usado, ainda em 1947, para expor emulsões nucleares (tipos especiais de chapas fotográficas) e detectar mésons pi.

Nascia, assim, em 1962, a Colaboração Brasil-Japão (CBJ), com o objetivo de estudar as interações de altíssimas energias produzidas pela radiação cósmica e detectadas a partir de equipamentos mais sofisticados expostos naquele monte: as chamadas câmaras de emulsão nuclear (ver ‘Câmaras duplas usam piche como alvo’).

Até hoje, a CBJ expôs 24 câmaras de emulsão, com as quais estudou os principais aspectos relativos à produção múltipla de partículas na região de energia cobrindo o intervalo de  $10^{13}$  a  $10^{17}$  elétrons-volt (ver ‘Laboratório prepara telescópio para múons cósmicos’)

Entre as descobertas mais espetaculares da CBJ, podemos citar os eventos centauro, que até hoje são objeto de pesquisa

em aceleradores. Esses eventos são denominados ‘exóticos’ por alguns pesquisadores, por não se enquadrarem exatamente nos modelos físicos conhecidos, e, se forem confirmados experimentalmente, poderão ser o indício de um novo tipo de interação ainda desconhecida. ■



Da esq. para dir.: Luiz Carlos Santos de Oliveira, Margareth Q. N. Soares e Gabriel Luís Azzi.

# Técnicas para espionar a matéria

A física conta hoje com um amplo arsenal de técnicas capazes de extrair da matéria informações cada vez mais detalhadas, em nível atômico. Entre essas técnicas, está a CATD, que se utiliza de espões' radioativos para conhecer a estrutura e as propriedades dos sólidos.

**Atualmente,** há uma insistência muito grande na obtenção de materiais que sirvam para aplicações tecnológico-industriais. Nessa lista, continuamente acrescida de novos itens, incluem-se os chamados 'novos materiais': cerâmicas supercondutoras de eletricidade, líquidos que cintilam quando atravessados por partículas, sistemas metálicos de multicamadas, como os utilizados para a construção de componentes eletrônicos.

Para acompanhar esses desenvolvimentos, a física da matéria condensada, dedicada ao estudo das propriedades dos sólidos, conta com técnicas tradicionais de caracterização, como, por exemplo, a difração de raios X, ao lado de um significativo arsenal de novas técnicas que vêm surgindo e se firmando na obtenção de detalhes e propriedades da estrutura do material estudado no que se refere aos aspectos de fenomenologia básica que apresentam, para assim melhor compreender os seus desempenhos.

Essas técnicas mais recentes e que permitem o registro de informações em nível da escala atômica vêm tendo crescente desempenho para as caracterizações estrutural e funcional >>>

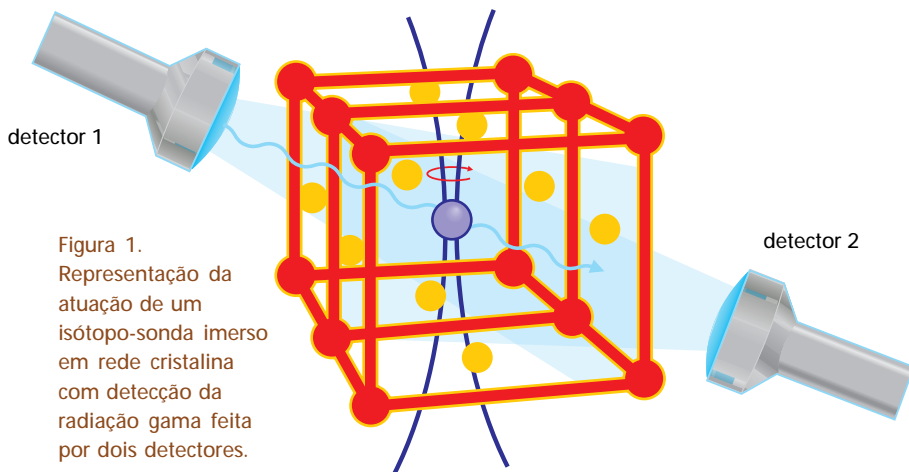


Figura 1. Representação da atuação de um isótopo-sonda imerso em rede cristalina com detecção da radiação gama feita por dois detectores.

de vários tipos de materiais. Dentre elas, com potencial particularmente poderoso para a investigação dos sólidos, está a correlação angular tempo-diferencial (CATD), a qual passaremos a detalhar.

**CASCATA NUCLEAR.** Como toda a técnica, a CATD tem suas peculiaridades e exigências. No caso, é necessário introduzir, química e/ou metalurgicamente, na rede cristalina da amostra em estudo os chamados isótopos-sonda emissores de radiação gama – esta uma radiação emitida pelo núcleo atômico, enquanto os raios X têm origem nas camadas eletrônicas dos átomos.

O fato de os isótopos-sonda serem átomos cujos núcleos emitem radiações gama deve-se ao caráter de instabilidade desses núcleos no que se refere a um excesso de energia acumulada que tende justamente a ser liberada sob a forma desse tipo de radiação. Nesse processo, denominado decaimento, o núcleo livra-se do excesso de energia e torna-se então estável, caráter extensivo ao átomo como um todo.

Átomos cujos núcleos decaem emitindo radiações são conhecidos como radioativos. Essa liberação da energia pode se dar em várias etapas, ou seja, o núcleo vai emitindo radiações gama com diferentes valores entre si, até atingir o seu estado-base estável. Diz-se, então, que o núcleo decaiu através de uma 'cascata nuclear', que é característica para um determinado átomo radiativo.

**IMERSOS NA MATÉRIA.** Os isótopos-sonda, todos iguais entre si, são introduzidos em grande número – aproximadamente  $10^{11}$  (cem bilhões!) – na amostra em estudo. Apesar de ser um número 'estonteante', ainda assim é várias ordens de grandeza menor do que o número de átomos da amostra

em que são imersos, justamente para não interferir nas propriedades que são o motivo de interesse.

Esses isótopos-sonda irão funcionar como 'espiões', enviando para o exterior 'informações' sobre o que estiver acontecendo à sua volta, através das radiações gama emitidas (figura 1). Essas radiações, invisíveis e sem carga elétrica, podem ser detectadas, mas não medidas e/ou registradas diretamente. Assim, depois de detectadas, são 'transfiguradas', por intermédio de equipamento adequado, em pulsos eletrônicos que podem ser devidamente conformados e registrados.

**CATD.** E aí se faz uso de propriedades relacionadas à emissão de radiação gama nuclear: uma constatação bem inicial é a de que a detecção dessas radiações em vários pontos equidistantes em torno da amostra indica que a intensidade medida é praticamente a mesma para todos os pontos. Em linguagem mais técnica, diz-se que a intensidade de radiação é isotrópica. No entanto, é conhecido que a intensidade da radiação gama nuclear detectada em uma determinada direção depende de propriedades de orientação do estado nuclear naquele momento da emissão.

A aparente isotropia deve-se ao fato de que uma enorme quantidade de isótopos-sonda – lembrem dos cem bilhões? – foi introduzida na amostra, incorrendo em praticamente todas as possibilidades de orientação dos estados nucleares.

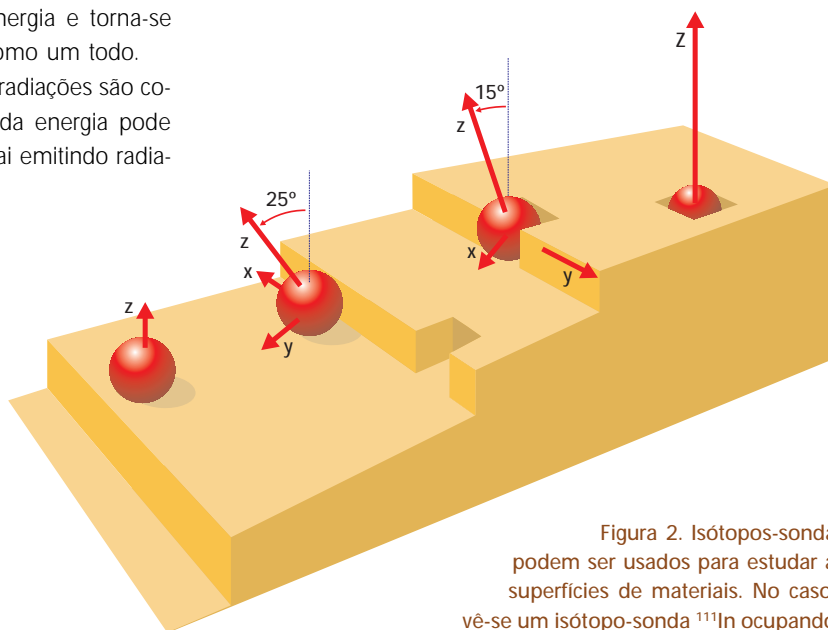


Figura 2. Isótopos-sonda podem ser usados para estudar a superfícies de materiais. No caso, vê-se um isótopo-sonda  $^{111}\text{In}$  ocupando locais (sítios) em camadas na superfície de cobre.

Em verdade, as direções de emissão dependem dessas orientações, que, por sua vez, impõem um caráter anisotrópico – este sim um caráter real – às direções de emissão, detectável sempre que se possa detectar as radiações provenientes de uma fração dos núcleos, fração esta com uma bem determinada e idêntica configuração de seus estados.

O que a CATD permite é justamente explicitar e medir essa anisotropia através do arranjo dos detectores e do processamento adequado dos registros eletrônicos.

**INTERAÇÕES HIPERFINAS.** No entanto, essas configurações de estado nuclear que determinam a direção da emissão da radiação gama podem ser modificadas sempre que os isótopos-sonda interagirem com os campos eletromagnéticos em torno deles, originários das cargas elétricas presentes nos núcleos atômicos que formam a amostra.

Essas interações são conhecidas como Interações Hiperfinas (IH). E é justamente a possibilidade de alterar a anisotropia através dessas interações que torna a CATD um instrumento poderoso de pesquisa em física da matéria condensada.

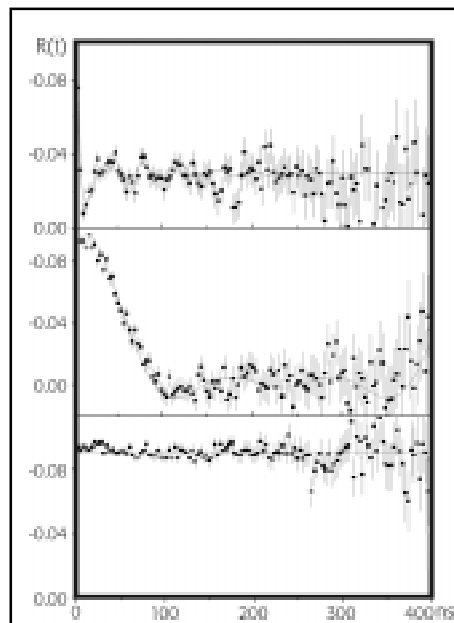


Figura 3. Espectros CATD medidos no sistema catalítico Pt-In/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  em diferentes temperaturas.

**PROTEÍNAS E METAIS.** A CATD tem sido utilizada nas mais diversas áreas para análise e caracterização dos sólidos. Por exemplo, ela vem sendo empregada para conhecer como diferem as propriedades de metais presentes em macromoléculas (proteínas, por exemplo) daquelas em que esses elementos se encontram em complexos moleculares inorgânicos. É também empregada para

estudar o comportamento e as propriedades de superfícies metálicas (figura 2) ou para conhecer como o movimento dos átomos se altera no interior de uma rede cristalina de um sólido de acordo com a temperatura.

Com técnicas como a CATD, aliada a outras, tem sido possível extrair da matéria informações em nível atômico cada vez mais detalhadas. E graças a essa vasta gama de informações, vão se aprofundando e ampliando os conhecimentos sobre a matéria, permitindo a obtenção de novos e sofisticados produtos que vão se incorporando ao nosso dia-a-dia. ■

## TRABALHO RENDEU PRÊMIO EM CONGRESSO INTERNACIONAL

Como ilustrações das ordens de grandeza em que a CATD pode atuar, experimentos de difusão em metais realizados pelo Grupo de Correlação Angular (GCA/CBPF), em colaboração com colegas do ISKP, em Bonn (Alemanha), mostraram que no  $\text{HfD}_2$ , acima de 790 graus celsius, os átomos de deutério (D) se deslocavam a partir de saltos com intervalos entre si da ordem de dois bilionésimos de segundo!

Em colaboração com o Grupo de Catalise do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal Fluminense (UFF), o GCA/CBPF realizou uma série de experimentos CATD no sistema catalítico Pt-In/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  cujos resultados indicaram um esta-

do multicomponente para os átomos de In (índio) na superfície dos catalisadores: enquanto parte dos átomos de In interage fortemente com a Pt (platina) formando *clusters* (aglomerados), outra fração permanece fortemente ligada à superfície da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), enquanto uma fração dos átomos de In é móvel em condições reacionais (figura 3).

Esses resultados foram apresentados recentemente no X Congresso Brasileiro de Catalise, realizado em Salvador, em setembro de 1999, e no XII *International Congress of Catalysis*, em Granada (Espanha), em julho de 2000, contribuição que laureou nosso colaborador da UFF com o prêmio 'Jovem Cientista' outorgado pela I.A.C.S. (*International Association of Catalysis Societies*).



Da esq. para dir.: Paulo Roberto de Jesus Silva, José Thadeu P. D. Cavalcante e Henrique Saitovitch.

# Um pouco de história

“Assim [...] seria erigida, no solo do Rio de Janeiro, a instituição evocadora do atributo de representação do país no mundo da ciência moderna e de fronteira: o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.”

Do livro: *Físicos, Mésons e Política – a dinâmica da ciência na sociedade*

**CASSINOS E CONTADORES.** A fundação em 1949 do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – mais conhecido pela sigla CBPF – foi favorecida pelo cenário político do pós-Segunda Guerra. Porém, sua história começou a germinar ainda no início da década de 1940, alimentada por resultados de repercussão internacional obtidos por físicos brasileiros.

Mario Schenberg (1914-1990), por exemplo, em colaboração com o físico russo George Gamow (1904-1968), descobriu o chamado Processo Urca. O trabalho explica os mecanismos envolvidos na explosão de estrelas gigantes, fenômeno denominado supernova, destacando o papel desempenhado pelos neutrinos. Essas partículas sem carga – e supostamente sem massa – não teriam dificuldade em viajar da região central às camadas mais externas, roubando calor do caroço estelar. Isso leva à diminuição da pressão no interior da estrela, o que acaba ‘puxando’ as camadas externas para a parte central.

Para compensar essa perda de energia, o caroço estelar deverá esquentar e, como esse calor não tem como escapar, as camadas externas expandem-se, produzindo uma explosão luminosa, a supernova. O nome peculiar foi proposto por Gamow, que viu no fenômeno uma analogia com a velocidade com que o dinheiro ‘sumia’ das mãos dos apostadores no Cassino da Urca – mais tarde, sede da hoje extinta TV Tupi. O trabalho de Gamow e Schenberg, com o título *‘Neutrino Theory of Stellar Collapse’*, foi publicado na revista *Physical Review* (59, 539-547, 1941).



Grupo de professores na frente da Faculdade Nacional de Filosofia, no Largo, no largo do Machado, bairro do Catete (Rio de Janeiro), na década de 1940. Da esq. para dir. Alcântara Gomes, Elisa Frota-Pessoa, Jayme Tiomno, Joaquim Costa Ribeiro, Luigi Sobrero, Leopoldo Nachbin, José Leite Lopes e Maurício Peixoto. Com exceção de Alcântara Gomes e Sobrero – este um matemático italiano –, os outros foram sócios fundadores do CBPF.

Na área experimental, Marcello Damy de Souza Santos, depois de passar os anos de 1938 e 1939 na Inglaterra, projetou no Brasil contadores de partículas cerca de dez vezes mais velozes que os então disponíveis para os grupos que pesquisavam raios cósmicos, partículas energéticas que vêm do espaço e, ao se chocarem com átomos da atmosfera terrestre, formam um tipo de chuva de partículas.

Os contadores de Damy foram fundamentais para a obtenção, a partir de 1939, dos primeiros resultados originais nas pesquisas com raios cósmicos feitas por uma equipe em São Paulo liderada pelo físico italo-russo Gleb Wataghin (1899-1986).

### ESTADO SÓLIDO E SALINHA APERTADA.

Os resultados em São Paulo motivaram colegas da Faculdade Nacional de Filosofia (FNFi), da então Universidade do Brasil – hoje, Universidade Federal do Rio de Janeiro. À época, a pesquisa em física na então capital federal resumia-se a duas frentes. No Instituto Nacional de Tecnologia, o físico alemão Bernhard Gross, radicado no Brasil desde 1933, liderava estudos sobre física do estado sólido (hoje, física da matéria condensada), depois de ter se dedicado, nos primeiros anos depois de sua chegada ao país, ao estudo pioneiro de raios cósmicos.

A segunda frente era mais modesta: o físico Joaquim Costa Ribeiro (1906-1960) e assistentes ocupavam uma salinha apertada, na Universidade do Brasil, cedida por Carlos Chagas Filho (1910-2000). Porém, foi nesse ambiente precário que se chegou, em 1944, ao chamado efeito termodielétrico, relacionado a propriedades condutoras dos sólidos. Primeiramente detectado na cera de carnaúba, o efeito Costa Ribeiro – como ficou conhecido – foi posteriormente observado em outros materiais.

### CAÇA AOS MÉSONS.

No entanto, a descoberta de uma nova partícula e sua posterior detecção – e principalmente este último fato – seriam fundamentais para acelerar a criação do CBPF. A primeira ocorreu em 1947 no Laboratório H. H. Wills, na Universidade de Bristol (costa oeste da Inglaterra). Lá, uma equipe liderada pelo físico inglês Cecil Frank Powell (1903-1969), descobriu o méson pi – Powell ganharia o Nobel de 1950 principalmente por esse trabalho.

O méson pi era visto na época como uma partícula elementar responsável pela força forte, que mantém o núcleo dos átomos coeso. Hoje, sabe-se que os mésons são formados por um par de partículas menores (quark e antiquark) que é mantido unido pela ação (ou troca constante) de outras partículas, os glúons – cujo nome tem origem na palavra inglesa *glue* (cola).

Entre os pesquisadores do H. H. Wills, estava o físico brasileiro Cesar Lattes, então com 23 anos de idade, que participou dos trabalhos que levaram à descoberta dos mésons pi (ou píons). O processo envolveu a exposição de emulsões nucleares (chapas fotográficas especiais) em altitudes elevadas – no caso, no Pic du Midi (França) – para captar as desintegrações causadas pelo choque de raios cósmicos contra partículas da atmosfera terrestre, tendo os píons como um dos subprodutos dessas colisões.

Depois de uma série de artigos, finalmente a equipe de Bristol chegou, na edição de 24 de maio da revista científica *Nature*, ao trabalho que traz a primeira evidência da descoberta (*Processes Involving Charged Mesons*, vol. 159, 694, 1947).



Primeiro relatório do CBPF.

### PARTÍCULAS NO ACELERADOR.

A descoberta do méson pi foi confirmada meses depois a partir de chapas expostas por Lattes no Monte Chacaltaya (5.600 metros de altitude), na Bolívia. O fato demonstrava a previsão teórica feita cerca de uma década antes pelo físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981), que por esse trabalho ganhou o Nobel de física de 1949, o primeiro dado a um cientista do Japão.

No entanto, foi a detecção de mésons pi produzidos pelo choque de partículas no então mais potente acelerador de partículas, o sincrociclotron da Universidade da Califórnia, em Berkeley (Estados Unidos), que impulsionaria a criação do CBPF. Nesse trabalho, Lattes trabalhou em conjunto com o físico norte-americano Eugene Gardner (1913-1950).

Enquanto a descoberta do méson pi em 1947 ficou praticamente restrita à comunidade internacional de físicos – no entanto, sabe-se que dois diários, um de Bristol e outro de Manchester, a noticiaram –, a detecção em Berkeley, no ano seguinte, ganhou a atenção de jornais e revistas nos Estados Unidos (ver 'A nova descoberta da América'). No Brasil, foram os professores que usaram a imprensa para divulgar a detecção, aproveitando o fato para alavancar a criação de um centro de pesquisas em física no país – essa divulgação na imprensa ocorreu muito por iniciativa dos físicos José Leite Lopes e Guido Beck, este último na época ainda na Argentina.

## A NOVA DESCOBERTA DA AMÉRICA

O texto abaixo foi extraído da edição comemorativa de 50 anos da revista *LNL News Magazine* (vol. 6, n. 3, 1981), publicada pelo Lawrence Berkeley National Laboratory, onde Lattes e Gardner fizeram a detecção dos mésons pi no início de 1948.

A Universidade [da Califórnia] e a Comissão de Energia Atômica [dos Estados Unidos] anunciaram oficialmente a produção artificial de mésons em 9 de março de 1948. Como de costume, [Ernest] Lawrence [diretor do então Radiation Laboratory of Berkeley] usou a oportunidade para defender a construção de uma nova geração de aceleradores. "Para explorar integralmente o conhecimento que o méson pode nos fornecer, será necessária a construção de ciclotrons supergigantes" [A revista] *Time* noticiou a descoberta e sugeriu que o estudo dos mésons poderia "levar a uma fonte de energia atômica imensamente melhor do que a fissão do urânio." A Universidade da Califórnia explicou que o trabalho de Gardner e Lattes abriu a mais nova era desde a descoberta da fissão [do átomo]. "Ela poderia ser comparada com a descoberta da América".

## SUGESTÕES PARA LEITURA

Ao focar a história da física no Brasil ou a profissionalização da ciência no país, os livros e artigos da lista a seguir tratam, direta ou indiretamente, da história do CBPF – cabe ressaltar que a breve história do CBPF aqui apresentada teve como fonte principal o primeiro item da lista.

### LIVROS

#### Físicos, mésons e política – a dinâmica da ciência na sociedade,

Ana Maria Ribeiro de Andrade, Hucitec/Mast/CNPq, São Paulo-Rio de Janeiro, 1999.

A mais detalhada e bem-documentada história da criação e dos primeiros anos (1949-1954) do CBPF e de seus protagonistas, através do enfoque da chamada Nova História Social e Cultural das Ciências. Útil também para entender os laços entre políticos, cientistas e militares nas décadas de 1940 e 1950 no Brasil, que levaram à criação em 1951 do então Conselho Nacional de Pesquisas. Traz iconografia e índice onomástico.

#### Cesar Lattes e a descoberta do méson pi,

Francisco Caruso, Alfredo Marques e Amós Troper (eds.), CBPF, Rio de Janeiro, 1999.

Coletânea de artigos para comemorar os 50 anos da descoberta da partícula méson pi, reunindo depoimentos de cientistas brasileiros e estrangeiros envolvidos na descoberta, bem como artigos de pesquisadores e historiadores da ciência. Traz iconografia.

#### Cesar Lattes – 70 anos – a nova física brasileira,

Alfredo Marques (ed.), CBPF, Rio de Janeiro, 1994.

Obra em comemoração dos 70º aniversário de Cesar Lattes, reunindo desde depoimentos históricos até artigos primários relacionados ao tema. Traz iconografia.

#### Topics on cosmic rays – 60<sup>th</sup> anniversary of C. M. G. Lattes,

José Bellandi Filho Carola Chinellato e Ammiraju Pemmaraju (orgs.), Unicamp, Campinas, 1984, 2 volumes.

Obra em dois volumes para comemorar os 60 anos de idade de Lattes. Traz relação de trabalhos do homenageado, bem como artigos primários de colaboradores e depoimentos.

#### Perfis,

de Francisco Caruso e Amós Troper (org.), CBPF, Rio de Janeiro, 1997.

Coletânea com 35 artigos publicados na série Ciência e Sociedade, com destaque para o rico acervo de cartas do físico José Leite Lopes, um dos principais físicos brasileiros do século 20 e fundador do CBPF.

#### A formação da comunidade científica no Brasil,

Simon Schwartzmann, Finep-Companhia Editora Nacional, Rio de Janeiro-São Paulo, 1979.

A pesquisa documental da obra é completada com depoimentos de pesquisadores que ajudaram a construir a ciência no Brasil. Vasta bibliografia e cronologia abrangente e detalhada ao final.

#### Cientistas do Brasil,

Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, São Paulo, 1998.

Depoimentos de importantes pesquisadores que trabalharam no Brasil, sendo os textos, em sua grande maioria, reproduções de perfis publicados pela revista de divulgação científica Ciência Hoje, da SBPC. Inclui depoimento de físicos eminentes ligados à história do CBPF. Traz iconografia.

#### História da ciência no Brasil – acervo de depoimentos,

Centro de Pesquisa e Documentação de História Contemporânea do Brasil, da Fundação Getúlio Vargas, FINEP, Rio de Janeiro, 1984

Resumo dos depoimentos de 69 cientistas brasileiros ou que trabalharam no Brasil. O conjunto dos textos transcritos e revisados, depositados no CPDOC, é um material valioso para entender a implantação da ciência no Brasil.

#### Ciência na periferia – a luz síncrotron brasileira,

Marcelo Baumann Burgos, NESCE-Universidade Federal de Juiz de Fora, 1999.

Análise da fundação do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, examinando, entre outros tópicos, a origem do projeto e a inserção do CBPF. Detalha o contexto político em que se deu a implantação do LNLS, instalado em Campinas (SP). O livro tem origem em tese de doutorado defendida no Instituto Universitário de Pesquisas do Rio de Janeiro (Iuperj).

### ARTIGOS E TESES

#### A Faculdade Nacional de Filosofia e a criação de instituições científicas: o caso do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas,

Ana Elisa Gerbasi Coelho de Almeida, dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Educação, da UFRJ, em abril de 1992.

Reproduzida em agosto de 1995 na série Ciência e Sociedade, publicada pelo CBPF (CBPF-CS-007/95). Através da perspectiva da história da educação, a tese resgata, por meio de entrevistas, o papel do físico José Leite Lopes e de outros professores da Faculdade Nacional de Filosofia na criação do CBPF.

#### Os aceleradores lineares do general Argus e sua rede sociotécnica,

Ana Maria Ribeiro de Andrade e Aldo Carlos de Moura Gonçalves, publicado em Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência, n. 14, julho-dezembro 1995.

Descreve a história de quatro aceleradores construídos nas décadas de 1960 e 1970 no CBPF. Destaca o processo de decisão, bem como o uso das máquinas na pesquisa científica, sob o viés da chamada nova sociologia da ciência.

#### A física no Brasil,

artigo de Joaquim Costa Ribeiro, publicado em As Ciências no Brasil, de Fernando de Azevedo (org.), Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 2ª edição, vol. I, 1994.

Panorama sobre o desenvolvimento da pesquisa em física no Brasil até meados da década de 1950, escrito por um de seus principais e mais importantes protagonistas.

#### Bernhard Gross y la física de rayos cósmicos en el Brasil',

artigo de Marthia Cecilia Bustamante e Antonio Augusto Passos Videira, publicado na revista mexicana Quiju (vol. 8, n. 3, pp. 325-47, set.-dez., 1991).

Relato detalhado sobre as pesquisas pioneiras em raios cósmicos no Brasil feitas, ainda na década de 1930, pelo físico alemão Bernhard Gross, no Instituto Nacional de Tecnologia. Gross apoiou a fundação do CBPF.

#### A física no Brasil',

de Shozo Motoyama, capítulo de A História das ciências no Brasil, de Mario Guimarães e Shozo Motoyama (org.), Edusp, São Paulo, 1979.

O texto relata desde as primeiras aulas práticas de física até o estádio dessa disciplina em meados da década de 1970 no Brasil. Traz tabela com as principais linhas de pesquisa em física no país em 1978.

**RISCO FORA DA UNIVERSIDADE.** Aproveitando a repercussão na imprensa da época, professores da FNFi mobilizaram-se e fundaram o CBPF. A iniciativa, porém, trazia consigo um risco: fazer pesquisa fora da universidade com o apoio da iniciativa privada – a luta pela pesquisa dentro da Universidade do Brasil era tida como causa perdida, devido à resistência das gerações mais antigas e tradicionais que dominavam politicamente a instituição.

Porém, o apoio político – e principalmente financeiro – do então ministro João Alberto Lins de Barros foi fundamental para que a recém-fundada instituição tivesse garantido seu pronto funcionamento. João Alberto entusiasmou-se pela idéia e viu na fundação de um centro de física um caminho para as aplicações da energia nuclear voltadas para o desenvolvimento industrial do Brasil.

Fundou-se, então, o CBPF em 1949, como uma sociedade civil, com a participação de cientistas, políticos, militares, empresários, amigos e familiares, perfazendo ao todo 116 sócios fundadores, entre eles Cesar Lattes, José Leite Lopes e Jayme Tiomno (leia depoimentos exclusivos nesta edição). Em 15 de janeiro daquele ano, na primeira reunião, foram aprovados os estatutos, bem como escolhidos o conselho e a primeira diretoria – esta última, formada estrategicamente por João Alberto (presidente), contra-almirante Álvaro Alberto (vice) e Cesar Lattes (diretor científico).

**DOIS ANDARES PRÓPRIOS.** A primeira sede do CBPF foi na avenida Presidente Vargas, 40. E lá ele funcionou até ser transferido, em junho de 1949 para a rua Álvaro Alvim, 21, na Cinelândia, também no centro do Rio de Janeiro. Motivo: o espaço das quatro salas, alugadas, não era suficiente.

No início de 1951, o CBPF mudou-se mais uma vez. Passou a funcionar em um prédio – especialmente construído para ele com dinheiro doado pelo banqueiro Mário de Almeida – localizado no campus da Praia Vermelha da Universidade do Brasil (hoje, Universidade Federal do Rio de Janeiro).

Dessa vez, eram 19 salas, distribuídas por um prédio de dois andares que ocupava cerca de 600 m<sup>2</sup> de área – mais tarde batizado edifício Mário de Almeida – existe até hoje, abrigando o Centro Latino-americano de Física e outras sociedades científicas, bem como parte das instalações das revistas de divulgação científica *Ciência Hoje* e *Ciência Hoje das Crianças*, publicadas pela Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência.

**A PÓS-GRADUAÇÃO PIONEIRA.** Já na década de 1950, o CBPF promovia cursos avançados, através da discussão de artigos e de seminários semanais – que nasceram principalmente pela iniciativa de Leite Lopes. Era um ambiente intelectualmente desafiador e convidativo, e foi através dele que o CBPF chegou à vanguarda do ensino universitário, ao criar a primeira pós-graduação em física do país. Vale destacar ainda que o Conselho Técnico-Científico da instituição funciona desde 1954.

O programa de pós-graduação era coordenado por Lattes, Leite Lopes e Tiomno, que também ministravam cursos regulares. Vários físicos estrangeiros de renome internacional também deram aulas nesses cursos, entre eles, só para citar alguns exemplos, o austríaco Guido Beck (1903-1988), o norte-americano Richard Feynman (1918-1988) – em 1965, Nobel de física – e o italiano Emilio Segrè (1905-1989), descobridor do antipróton e Nobel de física de 1959.

A iniciativa do CBPF contrastava com o espírito do autodidatismo e da retórica bacharelesca, ambos presentes na Universidade do Brasil, onde professores obtinham o título de doutor depois da defesa pública de trabalhos que, em geral, eram meramente compilações da literatura, sem contribuições inéditas resultantes de pesquisa própria. Inspirados pelo doutorado no CBPF, pesquisadores de ciências biológicas no Rio de Janeiro criaram pós-graduação para essa área.

**DE VOLTA À COMPETIÇÃO.** Nas décadas de 1950 e 1960, o CBPF deu contribuições de alta relevância e impacto internacional tanto para a física teórica quanto experimental – nesta última, especialmente, na área de raios cósmicos. No início dos anos 60, proje-

#### ATUAL ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DO CBPF

CTC	Conselho Técnico-Científico
CME	Coordenação de Matéria Condensada e Espectroscopia
CMF	Coordenação de Matemática Condensada e Física Estatística
CNE	Coordenação de Física Nuclear e Altas Energias
CCP	Coordenação de Teoria de Campos e Partículas
CRP	Coordenação de Relatividade e Partículas
CLAFEX	Coordenação do Laboratório de Cosmologia e Física Experimental de Altas Energias
CAT	Coordenação de Atividades Técnicas
CDI	Coordenação de Documentação e Informação Científica
CFC	Coordenação de Formação Científica
CAD	Departamento de Administração
SAA	Serviço de Apoio Administrativo
SEF	Serviço Financeiro
SMP	Serviço de Material e Patrimônio
SRH	Serviço de Recursos Humanos



tou e construiu aceleradores lineares de elétrons e, na área da matéria condensada, por exemplo, criou o primeiro laboratório Mössbauer da América Latina, graças ao pioneirismo do químico brasileiro Jacques Danon (1924-1989), passando a ser líder em aplicações desse efeito a diferentes ramos da química e da física – o efeito Mössbauer está relacionado com a emissão de radiação (do tipo gama) por núcleos atômicos quando submetidos a campos magnéticos.

Em 1972, o CBPF recebeu autorização do governo, através da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), para conceder diplomas de mestre e doutor em física. Desde então, tem mantido um elevado padrão de excelência em sua pós-graduação, nível reconhecido não só por avaliações periódicas da Capes, mas também por instituições brasileiras e internacionais (para um perfil atual do CBPF, ver 'Tome nota' nas primeiras páginas desta edição).

Em 1975, depois de grave crise institucional devido a dificuldades orçamentárias, o CBPF foi incorporado ao CNPq, passando a ser um dos seus institutos de pesquisa. Nesse novo âmbito, pôde voltar a se desenvolver, reconstituindo seu quadro de pesquisadores e dando ênfase ao desenvolvimento da pesquisa básica. Na área experimental, graças ao apoio do CNPq, modernizou seus laboratórios, tornando-os novamente competitivos. Foi pioneiro especialmente na participação nacional em grandes colaborações

internacionais na área de física de partículas. Com isso, sua produção científica voltou a atingir nível de excelência internacional.

**ATUAÇÃO NACIONAL.** Em três momentos distintos, o CBPF desempenhou um papel fundamental no cenário científico nacional, ao contribuir para a criação de outras instituições de renome, como do Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), em 1952, sediado no Rio de Janeiro (RJ); do Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC), em 1980, transferido recentemente para Petrópolis (RJ); e do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), em 1985, instalado em Campinas (SP).

Juntamente com o Instituto de Física da Universidade de São Paulo, o CBPF desempenhou um papel seminal na formação das primeiras gerações de físicos brasileiros e latino-americanos, bem como no desenvolvimento da física no Brasil. Ao longo de sua existência, tem abrigado grupos de excelência em várias áreas da física e, além de um Conselho Técnico-Científico, conta com uma estrutura moderna de administração para dar suporte aos trabalhos de pesquisa (*ver tabela com a 'Estrutura organizacional do CBPF'*).

Incorporado recentemente ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), o CBPF buscará agora ampliar sua atuação nacional – compatível com a nova situação institucional –, bem como reforçar seu papel internacional. ■

---

# Lembranças de um fundador

Os primeiros indícios da física no Brasil remontam à época do descobrimento, quando o padre José Anchieta (1534-1597) relatou a utilização de princípios da ciência pelos índios. Outros personagens, como Bartolomeu de Gusmão (1685-1724) e José Bonifácio de Andrada e Silva (1763-1838), também foram marcos dessa história.

No entanto, a consolidação da física no país se deu com a implementação da escola da disciplina na Universidade de São Paulo, em 1934. A partir do contato com físicos como Gleb Wataghin (1899-1986), Marcello Damy e Mário Schenberg (1916-1990), formou-se uma importante geração de físicos brasileiros. Esse novo grupo, do qual fazia parte Cesar Lattes, foi o responsável pela implementação de uma das mais importantes instituições de pesquisa da América Latina: o CBPF.

## LIGAÇÃO DE MADRUGADA

No final dos anos 1940, a física brasileira viveu um de seus grandes momentos. Uma nova geração despontava, tomando para si a responsabilidade da construção da ciência no país. O esforço des-

ses jovens pesquisadores resultaria na fundação de uma das principais instituições nacionais de pesquisa: o CBPF.

A idéia da criação de um grupo para realizar trabalhos em física nuclear e física de partículas no Rio de Janeiro surgiu

em 1943, quando Cesar Lattes e José Leite Lopes, dois dos mais importantes físicos brasileiros daquela geração, se conheceram em São Paulo. A possibilidade foi discutida novamente quatro anos mais tarde, quando Lattes, que

fora para a Inglaterra realizar as pesquisas que o levariam à descoberta do méson pi em raios cósmicos, estava de passagem pelo Brasil. No entanto, a perspectiva de fundar um centro amplo como o CBPF só surgiu em 1948, em Berkeley (EUA), onde o físico detectou os mésons pi produzidos artificialmente em um acelerador de partículas.

Nos Estados Unidos, Lattes conheceu Nelson Lins de Barros (1920-1966), funcionário do consulado brasileiro e irmão do ministro João Alberto Lins de Barros (1897-1955). Em visita ao Brasil, o físico reuniu-se com Leite Lopes e João Alberto para discutir a criação da nova instituição. O ministro se entusiasmou e deu total apoio à ideia. Lattes deixou uma procuração com seu colega e regressou a Berkeley. “No dia 15 de janeiro de 1949, João Alberto me ligou de madrugada: estava fundado o CBPF”, conta.

### BOLSAS DE ESTUDO

Em seu primeiro ano, o CBPF funcionou na rua Álvaro Alvim número 21, e por três meses contou com uma verba doada pelo próprio João Alberto, que assumiu a presidência. Lattes foi nomeado diretor científico, e voltou ao Brasil um mês depois da fundação. Ele e o ministro partiram então em busca de novas verbas para financiar a instituição, tarefa que foi facilitada pela notoriedade obtida com a descoberta do méson pi.

O trabalho no CBPF não se limitava a pesquisas em física. “Leopoldo Nachbin era um dos pesquisadores”, lembra Lattes, referindo-se ao renomado matemático brasileiro (1922-1993). A participação desses cientistas e o desenvolvimento de seus trabalhos logo fez com que a instituição se destacasse, e no ano da fundação o centro recebeu a visita de importantes pesquisadores estrangeiros que ministraram cursos de especialização. Richard Feynman (1918-1988), da Universidade de Cornell (Estados Unidos) e prêmio Nobel de física de 1965, veio pela primeira vez ao CBPF. Cecile Morette, do Instituto de

Estudos Avançados de Princeton, também nos Estados Unidos, deu um curso sobre partículas elementares.

Embora ainda não existisse o Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq; mais tarde, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), foi criado um programa de bolsas de estudo com verbas levantadas por Lattes e pelo ministro.

### COMBATE AO COMUNISMO

O espaço da rua Álvaro Alvim logo se tornou pequeno para o centro de pesquisas. Um acordo com a Universidade do Brasil (hoje, Universidade Federal do Rio de Janeiro) possibilitou a cessão de uma área de 600 m<sup>2</sup> no campus da Praia Vermelha, e a verba para a construção foi doada pelo banqueiro Mário de Almeida. “Pedimos autorização para colocar o nome dele no prédio, e ele perguntou por quê”, diz Lattes. Ele e o engenheiro Paulo Assis Ribeiro, que o acompanhava, explicaram que queriam incentivar outras pessoas a realizar doações, e o banqueiro concordou.

O prédio ficou pronto em 1950. Na mesma época, Leite Lopes e Jayme Tiomno, que estavam no exterior, voltaram ao Brasil e ao CBPF, onde trabalharam com física teórica. O grupo responsável por essa área seria complementado pela chegada do físico austríaco Guido Beck (1903-1988).

### GETULIO E A BOMBA

Novas dificuldades surgiram quando o ministro João Alberto adoeceu e se afastou da instituição. Lattes teve de buscar mais verbas, e foi com o vereador Paes Leme, amigo do ministro, pedir ajuda ao presidente da Confederação Nacional das Indústrias, Euvaldo Lodi (1896-1956). – o vereador fazia diariamente uma campanha contra Lodi no rádio, acusando-o de desviar verbas do Serviço Social das Indústrias (Sesi).

Lodi concordou em contribuir com 100 contos por mês. Lattes era o encarregado de receber a verba, mas nunca assinou um recibo. “Descobri bem mais

tarde que o dinheiro vinha de um fundo de combate ao comunismo”, diverte-se. “O gozado é que o CBPF era considerado um antro de comunistas.”

Com a fundação do CNPq e a eleição de Getúlio Vargas, em 1951, iniciou-se um período mais tranquilo. Lattes foi levado para uma conversa com Getúlio por Lutero Vargas, filho do novo presidente. “Getúlio me fez algumas perguntas sobre bomba atômica, depois disse que daria posse ao CNPq e que poderíamos contar com seu apoio.” Segundo Lattes, a promessa do presidente foi cumprida, e até seu suicídio o CBPF não sofreu com a falta de verbas.

### FEYNMAN E A MAÇANETA

Nesse mesmo ano, Feynman retornou ao Brasil em licença sabática. Sua presença no CBPF foi bastante produtiva, e rendeu algumas histórias. Lattes conta que, certa vez, tinha dado ordem a um rapaz que cuidava da portaria para que não deixasse que sujassem a porta do banheiro, que havia sido pintada. “Eu disse a ele: quando vier alguém, você ensina como abrir a porta.”

A primeira pessoa que apareceu foi justamente o físico norte-americano. O rapaz, muito obediente, dirigiu-se a ele para ensinar como girar a maçaneta. “Feynman ficou indignado. Ele passou duas horas gritando que era um físico altamente qualificado, e que não precisava que ninguém lhe ensinasse a abrir a porta do banheiro”, conta.

Lattes relembra com carinho os companheiros dos primeiros anos do CBPF. Embora a partir de 1955 ele tenha se dedicado a construir outros centros de excelência, seu afastamento da instituição nunca foi completo. Hoje, passados mais de 50 anos da fundação, ele vai sempre que possível ao CBPF, que funciona em um prédio com seu nome. A explicação para tamanha dedicação vem de sua mulher, a professora Martha Lattes, que ajudou na construção do projeto. “O CBPF é fruto de uma paixão.” ■ >>>

# Sonho com a física no Rio

Um centro de pesquisa no Rio de Janeiro, dedicado à física teórica e nuclear. Esse era o sonho de José Leite Lopes, um dos fundadores do CBPF. O centro – fundado em companhia de vários físicos, entre eles Cesar Lattes e Jayme Tiomno – foi em grande parte idealizado por Leite Lopes, um pernambucano cuja primeira graduação foi em química.

Leite, como é chamado pelos companheiros, além de participar da fundação do CBPF, foi chefe de seu departamento de física teórica e organizou os primeiros seminários. Ainda hoje, freqüenta o centro pelo menos duas vezes por semana, e orgulha-se do desenvolvimento da instituição. “Há físicos formados no centro trabalhando em todo o país”, diz ele.

## Física no Rio

As primeiras idéias de fundar um centro de pesquisa no Rio de Janeiro ocorreram a Leite Lopes quando ele ainda era recém-formado em física. Leite fez a primeira graduação, em química, em sua cidade natal, na Escola de Química do Recife, e lá se interessou por física nas aulas de Luiz Freire (1896-1963). Ele decidiu vir para a então capital do país para cursar física na Faculdade Nacional de Filosofia (FNFi), onde estudou com parte do grupo que mais tarde fundaria o CBPF: entre os colegas do físico pernambucano estavam Elisa Frota-Pessôa e Jayme Tiomno.

Uma vez formado em física, Leite Lopes foi trabalhar com Carlos Chagas Filho (1910-2000) em biofísica. Seu interesse maior, no entanto, era na área de física teórica voltada para física nuclear e de partículas. Como não havia grupos que desenvolvessem pesquisas nessa área no Rio de Janeiro, o jovem foi para São Paulo, onde passou a integrar a equipe de Mário Schenberg (1914-1990). Lá, Leite conheceu Cesar Lattes, com quem discutiu a necessidade de montar um centro de pesquisas na capital.

## Temporadas no exterior

Pouco tempo depois, Leite partiu para Princeton (Estados Unidos), e Lattes para Bristol (Inglaterra). Os dois se correspondiam, e acalentavam o sonho do centro de pesquisas carioca. Em suas cartas, o pernambucano ressaltava a importância

de Lattes, ao voltar do exterior, ir para o Rio de Janeiro e não para São Paulo. Em 1946, Leite voltou ao Brasil e fez o que aconselhara ao colega: instalou-se no Rio de Janeiro, onde foi contratado pela FNFi para dar aulas de física teórica e física superior.

Em Bristol, Lattes fazia as pesquisas que o levariam à descoberta do méson pi (ou píon). Quando veio ao Brasil, enquanto esperava o resultado de chapas fotográfica que havia exposto na Bolívia, ele e Leite conversaram mais uma vez sobre a possibilidade de fundarem o centro.

A descoberta do méson pi e sua detecção no acelerador de Berkeley (Estados Unidos) por Lattes ajudaram a concretizar o ideal de uma instituição voltada para a pesquisa física. A detecção teve repercussão no exterior, mas foi no Brasil que o resultado foi amplamente divulgado na imprensa, uma iniciativa que ficou a cargo de Leite Lopes. Além disso, Leite ainda tratou de propor à congregação da FNFi que se criasse uma cadeira de física nuclear para Lattes.

## Em família

Em Berkeley, Lattes conheceu Nelson Lins de Barros, irmão do então ministro João Alberto (1897-1955). “Ele mandou o Nelson conversar comigo no Rio para ver como estavam as coisas”, lembra Leite. O físico disse que não estavam fáceis. A universidade não dava apoio à iniciativa, e era difícil obter verbas para a construção do centro.

Quando Lattes foi passar uma temporada no Rio de Janeiro, ele e Leite se reuniram com o almirante Álvaro Alberto (1889-1976), que era representante do Brasil na Comissão de Energia Atômica da Organização das Nações Unidas (ONU). Na casa do ministro, Leite descobriu que a mulher de João Alberto era filha da segunda mulher de seu pai, com quem havia perdido contato. “Ficou tudo em família”, brinca.

O ministro se propôs a financiar um centro de pesquisa em física com o próprio dinheiro. Decidiu-se, então, pela fundação de uma organização particular. Lattes deixou uma procuração com Leite Lopes e regressou a Berkeley. Em 15 de janeiro de 1949, o CBPF foi fundado. “Assinei como procurador do Lattes e esqueci de assinar por mim”, diverte-se Leite, que nem por isso deixa de ser fundador. “Minha assinatura está na ata da reunião”, lembra.

Pouco tempo depois, Lattes voltou de Berkeley e foi morar no Rio de Janeiro. Leite, porém, conviveu por pouco tempo com ele. O físico pernambucano logo voltou para Princeton para mais uma temporada. Lá estava também Jayme Tiomno.

## Centro internacional

Na volta ao Rio de Janeiro, Leite Lopes encontrou o CBPF em endereço novo. A instituição, que no início funcionava na rua Álvaro Alvim, no centro da cidade, mudou-se para um pavilhão construído no

terreno da universidade com o dinheiro do banqueiro Mário de Almeida. Leite assumiu o departamento de física teórica, e passou a selecionar jovens para se formar e trabalhar na instituição.

Um acordo firmado com a universidade fez com que os cursos dados no CBPF fossem reconhecidos, e alguns professores passaram a dar aulas também na Universidade do Brasil (hoje, Universidade Federal do Rio de Janeiro). Com a fundação do Conselho Nacional de Pesquisa (mais tarde, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), no mesmo ano, o CBPF passou a contar com uma verba específica e bolsas de estudo. Vinham alunos de diversas partes do Brasil, da América Latina e de outros países.

### A vez da América Latina

O físico austríaco Guido Beck (1903-1988), que na época estava na Argentina, também mudou-se para o Rio de Janeiro. A princípio, ele veio por um período curto para trabalhar com Lopes e

Tiomno no departamento de física teórica, mas se encantou e decidiu ficar.

Outra importante participação foi a de Richard Feynman (1918-1988), físico norte-americano ganhador do prêmio Nobel de física de 1965. Ele visitara o CBPF no ano da fundação, e voltou no seu ano sabático para uma temporada mais longa. Ele e Leite passaram trabalhar juntos. Por anos, durante o verão no Brasil, Feynman freqüentou o CBPF, contribuindo bastante para os trabalhos desenvolvidos.

Em 1959, Leite foi um fundadores da Escola Latino-americana de Física, juntamente com o mexicano Marcos Moshinski e o argentino Juan José Giambiagi (1924-1996). Inspirado por essa idéia, o físico brasileiro propôs a criação do Centro Latino-americano de Física (CLAF), com sede no CBPF. Essas iniciativas ajudaram a desenvolver e a integrar a física em todo o continente.

### Tempos difíceis

Em 1960, Leite assumiu a direção científica do CBPF. O golpe militar, em 1964,

no entanto, o afastaria por dois períodos da instituição. Assim que começou a ditadura, Leite pediu demissão do cargo, e partiu para a França, de onde regressou em 1967. Seu regresso foi motivado por uma petição de estudantes que pediam sua volta. O Congresso estava funcionando, e havia uma nova constituição. Leite acreditava que poderia ser o início da abertura política.

Dois anos mais tarde, porém, o Ato Institucional número 5 (AI-5) aposentou compulsoriamente vários cientistas, entre eles Leite Lopes, que regressou à França em 1970, onde mais tarde se tornaria professor emérito na Universidade de Estrasburgo. Havia governos ditatoriais em toda a América Latina, e o trabalho científico no continente foi extremamente prejudicado.

Assim que possível, no entanto, Leite retornou ao Brasil e ao CBPF, onde se tornou diretor científico novamente. Mesmo sem fazer concessões quanto a suas idéias, ele foi um dos primeiros cientistas a voltar após o AI-5.

# Ensino e pesquisa como meta

**Em 1949, quando o CBPF foi fundado, Jayme Tiomno não estava no Brasil. No entanto, sua participação no processo de elaboração e formação do CBPF faz com que ele seja conhecido como um dos principais fundadores. Tiomno e sua mulher, a física Elisa Frota-Pessôa – responsável pelo primeiro trabalho realizado no CBPF e publicado em revista científica – tiveram um papel importante no estabelecimento do CBPF como um centro de ensino e pesquisa.**

### Sonho de pesquisa

No início dos anos 1940, a quase ausência de pesquisas na Faculdade Nacional de Filosofia (FNF), da Universidade do Brasil (hoje, Universidade Federal do Rio de Janeiro), estimulou a idéia de fundar um centro de física no Rio de Janeiro. A falta de oportunidade para vir a realizar pesquisas teóricas e experimentais incomodava Jayme Tiomno, Elisa Frota-Pessôa e José Leite

Lopes, jovens estudantes do curso de física da faculdade. Essa mobilização de alunos em um grupo contava também com o matemático Leopoldo Nachbin (1922-1993), aluno da Escola Nacional de Engenharia. "Leite Lopes costumava dizer que éramos os três mosqueiros (ele, Jayme e eu), e d'Artagnan (Nachbin)", diz Elisa. Alguns deles foram depois para São Paulo, onde cientistas estrangeiros trazidos pela Univer-

sidade de São Paulo (USP) formavam a primeira geração de físicos brasileiros. Com bolsas oferecidas pelo físico Mário Schenberg (1914-1990), Leite Lopes, Tiomno e Elisa partiram, sucessivamente, para a USP.

### Discussões em Princeton

No final da década de 1940, jovens cientistas brasileiros dessa geração foram para o exterior, onde tiveram a oportu- >>>

nidade de trabalhar com grandes nomes da comunidade científica internacional. Em 1948, Tiomno, que havia se demitido da FNFi para ser contratado pela USP, foi para Princeton (Estados Unidos), para trabalhar com o físico John Wheeler. “Me avisaram que ele era duro, exigente, e que o trabalho não seria fácil”, diz ele. “Anos mais tarde, o Wheeler comentou que nunca tinha trabalhado tanto quanto comigo”, conta.

Durante essa estada, Tiomno colaborou com os prêmios Nobel Eugene Wigner (1902-1995), Chen Ning Yang e, mais tarde em Londres, com Abdus Salam (1926-1996).

Em Princeton, a criação de um centro de física no Rio de Janeiro voltou a ser discutida. As providências para a fundação estavam avançadas no Brasil, e Cesar Lattes foi para os Estados Unidos fazer uma reunião com os físicos brasileiros que estavam trabalhando em universidades americanas. Participaram da reunião Leite Lopes, Tiomno, Walter Schützer (1922-1963), Hervásio de Carvalho (1916-1999), bem como o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981). Yukawa ganharia o Nobel de física no ano seguinte, por sua teoria de 1935 que previu a existência do méson pi.

Pouco depois, o CBPF foi criado no Rio de Janeiro por um grupo que reunia cientistas, professores, políticos, militares, empresários, amigos e familiares, entre os quais estavam Leite Lopes e Elisa Frota-Pessôa.

### Primeiros passos

No primeiro ano do CBPF (1949), Tiomno conseguiu enviar físicos de renome internacional para trabalhar na instituição. Em uma conferência, encontrou o norte-americano Richard Feynman (1918-1988), que estava estudando espanhol, propondo a ele que estudasse português e fosse ao Rio de Janeiro passar uma temporada no CBPF. Feynman aceitou o convite, e voltou outras vezes ao país. A física francesa Cecile Morette, que estava nos Estados Unidos, foi outra das convidadas de Tiomno. Ele, no entanto, continuou seu

trabalho no exterior, só voltando ao Brasil em meados de 1950.

No Brasil, o CBPF começava a funcionar. Sua sede era na Rua Álvaro Alvim, número 21. Lá, foram desenvolvidas as primeiras pesquisas. Como Lattes assumiu a direção científica do CBPF, a seção de emulsões nucleares ficou a cargo de Elisa. Juntamente com Neusa Margem, ela pesquisou o decaimento do méson pi (ou pion) em elétron e neutrino (esta uma partícula sem carga), utilizando para isso microscópios emprestados até pela polícia. O mesmo tema de pesquisa estava sendo desenvolvido sem sucesso nos Estados Unidos e por isso ela chegou a ser aconselhada a desistir. No entanto, as duas físicas obtiveram resultados antes dos americanos.

### Notas de física

Embora Tiomno tivesse convites para permanecer no exterior, ele queria trabalhar no CBPF, que havia ajudado a fundar. Ele começou a desenvolver atividades no Rio de Janeiro assim que chegou, mas teve que morar em São Paulo por um tempo, para compensar sua licença remunerada na USP. Em 1952, Tiomno mudou-se definitivamente para a então capital do país, e assumiu a chefia do departamento de publicações do CBPF. Ele logo criou *Notas de física*, publicação que existe até hoje.

A distribuição, segundo Tiomno, era melhor que a da publicação da Academia Brasileira de Ciências (ABC). “Nós a mandávamos para os departamentos de física de muitas universidades estrangeiras”, diz ele. Um dia, ele recebeu uma carta da Sociedade Americana de Física que pedia para optar entre registrar *Notas de Física* como uma pré-publicação ou uma publicação. Optou pela pré-publicação. “Assim os trabalhos podiam ser publicados em revistas internacionais de ciência, que não aceitam republicar artigos”, explica.

### Experiências didáticas

Tiomno assumiu também a chefia do departamento de ensino e criou o laboratório didático do CBPF. “Quando Jayme

fundou o laboratório, a faculdade não tinha condições de desenvolver as aulas práticas”, conta Elisa. Ela levava então seus alunos para ter essas aulas no CBPF, onde tinham contato com pesquisadores. A instituição logo passou também a ter bolsistas de iniciação científica, que muitas vezes permaneciam no CBPF mesmo após a formatura – eles passavam a estudar nos primeiros cursos de pós-graduação em física do país.

A preocupação do casal com a educação levou-os a participar da implantação da Universidade de Brasília (UnB) em 1965. O agravamento da situação política, no entanto, afastou-os da nova universidade, e eles voltaram ao CBPF.

A seguir, passaram seis meses como cientistas visitantes em Trieste (Itália), em um programa de pesquisas em física de partículas. Tiomno então venceu concurso de cátedra na USP, onde organizou novo grupo de física teórica, que foi a base do atual Departamento de Física Matemática, de prestígio internacional. Elisa, continuando seus trabalhos experimentais, reorganizou o Laboratório de Emulsões Nucleares da USP, realizando pesquisas em física nuclear.

Com o Ato Institucional número 5 (AI-5), Tiomno e Elisa foram aposentados compulsoriamente – assim como Mário Schenberg e José Leite Lopes – e impedidos de retornar ao CBPF. Sem perspectivas no Brasil, eles partiram para o exílio, mas retornaram ao país assim que a situação política permitiu. Elisa e Tiomno passaram então a trabalhar na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, onde foram acolhidos por antigos discípulos e companheiros. Essa situação durou até que viesse a abertura política. Com ela, o CBPF recebeu de volta seus ‘exilados’, entre eles o casal, que ainda teve importante atuação científica.

Hoje, eles vão pouco ao campus da Praia Vermelha, onde fica o prédio que abriga o CBPF. Mas não deixam de acompanhar o que acontece lá. “O centro cresceu muito, e vários ex-alunos nossos ainda estão lá. Muitos outros estão espalhados por universidades e institutos brasileiros e estrangeiros”, diz Tiomno. ■

