

*SBF | SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA*

**50 ANOS**  
**1966 - 2016**

#### **PRESIDENTE**

Ricardo Magnus Osório Galvão (USP)

#### **VICE-PRESIDENTE**

Belita Koiller (UFRJ)

#### **SECRETÁRIO-GERAL**

Marcelo Knobel (UNICAMP)

#### **SECRETÁRIO**

Ivo Alexandre Hummelgen (UFPR)

#### **TESOUREIRO**

Carlos Chesman de Araújo Feitosa (UFRN)

#### **SECRETÁRIO PARA ASSUNTOS DE ENSINO**

Orlando Gomes de Aguiar Júnior (UFMG)

#### **CONSELHO**

##### **TITULARES (MANDATO 2013-2017)**

Adalberto Fazzio (USP e UFABC)

Márcia Cristina Bernardes Barbosa (UFRGS)

Caio Henrique Lewenkopf (UFF)

Sergio José Barbosa Duarte (CBPF)

José David Manguiera Viana (UnB/UFBA)

##### **TITULARES (MANDATO 2015-2019)**

Nelson Studart (UFABC)

Ildéu de Castro Moreira (UFRJ)

Suani Tavares Rubim de Pinho (UFBA)

Wagner Figueiredo (UFSC)

Álvaro de Almeida Caparica (UFG)

Ângela Burlamaqui Klautau (UFPA)

#### **SUPLENTES (MANDATO 2015-2017)**

Anna Maria Pessoa de Carvalho (USP)

Andrea Brito Latgé (UFF)

Nilson Marcos Dias Garcia (UTFPR)

Renata Zukanovich Funchal (USP)

Mikyia Muramatsu (USP)

Múcio Amado Continentino (CBPF)

#### **EDITOR CIENTÍFICO**

Marcelo Knobel

#### **PROJETO EDITORIAL**

Cássio Leite Vieira

#### **PROJETO GRÁFICO, DIAGRAMAÇÃO, INFOGRÁFICOS E TRATAMENTO DE IMAGENS**

Ampersand Comunicação Gráfica

(www.amperdesign.com.br)

#### **EDIÇÃO DE TEXTO**

Alicia Ivanissevich e Cássio Leite Vieira

(Zzero Comunicação)

#### **REVISÃO**

Salvador Nogueira

#### **AGRADECIMENTOS:**

Agradecemos aos Professores José David

Manguiera Viana, Marcos Pimenta e Mikiya

Muramatsu pelas valiosas contribuições e

discussões para a realização desta publicação.

## **SBF: 50 ANOS**

*“Aos quatorze dias do mês de julho de 1966, por ocasião da XVIII Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), reuniram-se no salão da Biblioteca Municipal Fritz Müller em Blumenau, Estado de Santa Catarina, em Assembléia, físicos, professores de Física, estudantes e pessoas interessadas com o objetivo de fundar a Sociedade Brasileira de Física.”*

Assim iniciou o físico Paulo Leal Ferreira (1925-2005) a descrição da Assembleia de Fundação da SBF, sociedade por ele secretariada e presidida pelo físico José Goldemberg. A iniciativa vinha consolidar o esforço de notáveis pioneiros que, com grande dedicação, trabalharam para implantar no país o ensino e a pesquisa de qualidade em física, a partir da década de 1930.

Nestes 50 anos, a SBF desenvolveu-se como uma sociedade vibrante que tem atualmente mais de 13 mil associados. Sua atuação tem se caracterizado não somente pelas atividades intrínsecas das sociedades científicas, mas também pela promoção de eventos, publicação de revistas científicas e estudos específicos, bem como pela forma soberana e independente com que participou de grandes questões relacionadas ao ensino e à política científica nacional.

Este livro conta um pouco dessa história e trata também da situação atual e das perspectivas das atividades desenvolvidas pela SBF em vários ramos da física, do ensino e da divulgação científica. Os textos foram encomendados por uma comissão presidida pelo físico Marcelo Knobel, sem que fossem impostas aos autores abrangência ou uniformidade de enfoque, o que conferiu a cada um dos artigos e das seções nesta publicação – com linguagem voltada para o grande público – uma riqueza ímpar de detalhes. Boa leitura!

**RICARDO GALVÃO**  
*Presidente da SBF*

# SUMÁRIO

## ONTEM E HOJE

### A física no Brasil de 1934 a 1966

*Dos alicerces da pesquisa à congregação da comunidade em uma sociedade*

ANTONIO AUGUSTO PASSOS VIDEIRA - UERJ..... 8

### SBF: 50 anos de conquistas

*Em defesa da pesquisa, do ensino e da formação de pesquisadores*

ANTONIO AUGUSTO PASSOS VIDEIRA - UERJ ..... 16

### A física no Brasil em números

*Breve panorama da produção científica da área nas últimas décadas*

PETER SCHULZ - Unicamp..... 26

### O que a física tem feito por você..... 30

## FRONTEIRAS DA FÍSICA

### Óptica e fotônica

*A luz a serviço da ciência, tecnologia e do bem-estar social*

CID B. DE ARAÚJO - UFPE..... 35

### Física estatística e computacional

*Conceitos e ferramentas para entender o comportamento coletivo da matéria*

MARCOS GOMES ELEUTÉRIO DA LUZ - UFPR..... 41

### Física nuclear e aplicações

*Desafios e perspectivas do conhecimento sobre o núcleo atômico*

ALINKA LÉPINE-SZILY e MAHIR S. HUSSEIN - USP..... 49

### Física de partículas e campos

*O universo entendido por meio de seus constituintes mais fundamentais*

ROGÉRIO ROSENFELD - Unesp..... 55

### Física de plasmas

*A ciência e as aplicações tecnológicas do quarto estado da matéria*

RICARDO L. VIANA - UFPR..... 61

### Pesquisa em ensino de física

*Passado, presente e futuro de um campo interdisciplinar do conhecimento*

CRISTIANO MATTOS - USP; NILSON GARCIA - UTFPR;  
SHIRLEY GOBARA - UFMS; ANDRÉ FERRER - UFRN;  
FERNANDA BOZELLI - Unesp..... 67

### Física atômica e molecular

*Dos bilhões de partículas à revolução das entidades quânticas isoladas*

ROBERTO RIVELINO DE MELO MORENO - UFBA..... 73

### Física médica

*Na interface de uma ciência da natureza com suas aplicações à saúde*

ANA MARIA MARQUES DA SILVA - PUCRS..... 79

### Física da matéria condensada e dos materiais

*A ciência básica e aplicada presente em praticamente tudo que usamos no dia a dia*

MARCOS A. PIMENTA - UFMG..... 87

**Magnetismo, supercondutividade e sistemas fortemente correlacionados**

MUCIO CONTINENTINO - CBPF..... 89

**Matéria mole e fluidos complexos**

ANTONIO MARTINS FIGUEIREDO NETO - USP..... 90

**Semicondutores, dispositivos, materiais bidimensionais e superfícies**

ADO JORIO - UFMG..... 92

**Novos materiais**

OSVALDO NOVAIS DE OLIVEIRA JUNIOR - USP..... 96

### Caminhos da física matemática

*Rigor matemático de uma área de fronteira com olhar para o mundo físico*

ALBERTO SAA - Unicamp..... 99

### Física biológica

*A sinergia com a biologia para entender as propriedades da matéria animada*

MARCELO LOBATO MARTINS - UFV..... 105

## CALEIDOSCÓPIO

### Financiamento da ciência no Brasil: o caso da física

*Baixos orçamentos e possível estagnação de bolsas comprometem CET nacionais*

ADALBERTO FAZZIO - USP e UFABC..... 114

### Professor de física neste século

*Desafios e possibilidades de uma carreira essencial para a ciência do país*

ANDREIA GUERRA DE MORAES - CEFET/RJ..... 119

### Mestrados profissionais em ensino de física

*Capacitar professores e melhorar a educação básica em um país extenso*

MARTA FEIJÓ BARROSO - UFRJ..... 122

### As publicações da SBF

*Do trabalho artesanal, caseiro e voluntário ao profissionalismo e à indexação*

SILVIO SALINAS - USP..... 124

### As Olimpíadas de Física da SBF

*Instrumento de disseminação, formação e análise educacional do país*

JOSÉ DAVID M. VIANA - UnB e UFBA..... 127

### Mulheres na física no Brasil

*Contribuição de alta relevância, mas, por vezes, ainda invisível*

GRASIELE BEZERRA e MARCIA BARBOSA - UFRGS... 130

### Grandes colaborações internacionais

*Brasil é protagonista em experimentos consagrados e grandes projetos*

RONALD CINTRA SHELLARD - CBPF..... 134

### Para onde deve ir a física do Brasil?

*Mobilização permanente para assegurar futuro promissor*

SERGIO MACHADO REZENDE - UFPE..... 139



# ONTEM E HOJE

# A física no Brasil de 1934 a 1966

*Dos alicerces da pesquisa à  
congregação da comunidade  
em uma sociedade*

---

ANTONIO AUGUSTO PASSOS VIDEIRA  
Departamento de Filosofia,  
Instituto de Filosofia e Ciências Humanas,  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro



A física no Brasil – pelo menos, a pesquisa de forma sistemática – tem seu início na década de 1930, com a vinda para o país de físicos estrangeiros, para as cidades de São Paulo e do Rio de Janeiro, onde se formaram a partir daí escolas nessa área.

Poucos anos depois, esses pioneiros obtiveram os primeiros resultados que dariam inserção internacional à pesquisa tanto teórica quanto experimental feita no país. Esses trabalhos – e a repercussão em torno deles – foram importantes para que, no início da década de 1950, se formasse no país uma estrutura político-administrativa para a ciência brasileira.

Esses sucessos iniciais, no entanto, perderam momento com os eventos que viriam a alterar drasticamente o cenário econômico e político do Brasil na década de 1960, quando os físicos – e, de certo modo, toda a comunidade científica brasileira – tiveram que responder ao regime militar com uma atitude ambígua: de um lado, com oposição às perseguições e ao autoritarismo; de outro, com aceitação das verbas estatais e com apoio ao sistema nacional de pós-graduação.

Esse caráter de oposição/adesão por parte dos físicos perpassou os cerca de 20 anos seguintes, até a volta à democracia, em meados da década de 1980, quando os físicos passaram a manter um diálogo permanente – mas nem sempre amistoso – com as esferas governamentais, em busca dos anseios de sua comunidade.

durante

Durante praticamente todo o século passado, a física foi um dos ramos das ciências naturais que mais desfrutaram de visibilidade e prestígio no Brasil. O início da física moderna no país – ou seja, da pesquisa feita de forma profissional – deu-se basicamente na década de 1930 e está associado a dois nomes: o ítalo-ucraniano Gleb Wataghin (1899-1986) e o alemão Bernhard Gross (1905-2002). Antes deles, o engenheiro, físico e matemático brasileiro Theodoro Ramos (1895-1937), professor da Escola Politécnica de São Paulo, havia feito trabalhos esporádicos nessa área.

Até então, inexistiam no Brasil associações de caráter científico com força suficiente para mudar o cenário da ciência em nível nacional. A Academia Brasileira de Ciências, fundada no Rio de Janeiro (RJ), em 1916, não havia conseguido, até aquele momento, promover mudanças significativas em prol da pesquisa científica ou da dedicação integral a essa atividade, apesar de ter nascido como fruto de um movimento – com ori-

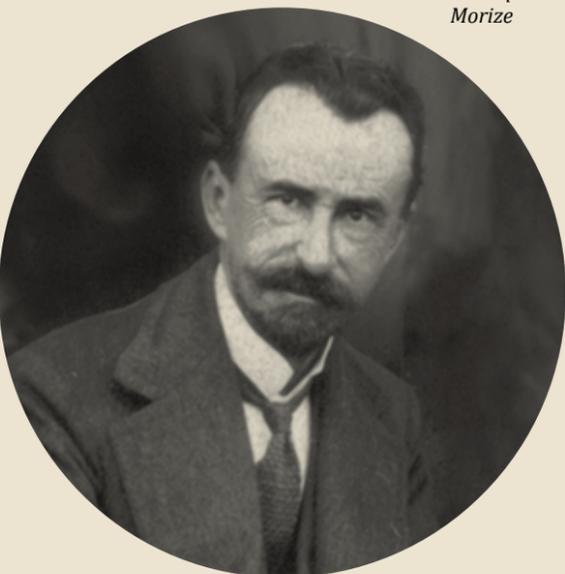
gens ainda no século 19 – em prol da im-

plantação no país da dita ‘ciência pura’ (hoje, básica).

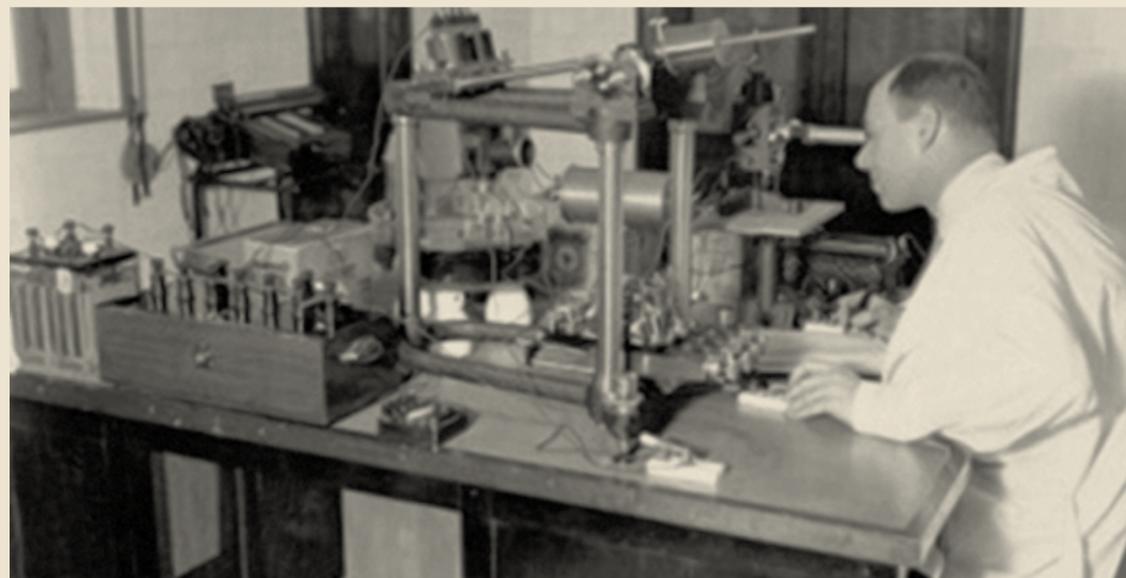
Antes de 1934, não se pode falar em física teórica no Brasil. Não havia pesquisa sistemática nessa área no país, e o ensino dessa disciplina existia só nas escolas de engenharia e faculdades de medicina. Essa situação era uma regra que perdurava desde o início do século 19, justificada por exceções, como a do próprio Theodoro Ramos e de outros engenheiros, como Otto de Alencar (1876-1912), Henrique Morize (1870-1930) e Manuel Amoroso Costa (1885-1928), os quais se dedicavam ao tema mais por iniciativa própria do que como reflexo de um política institucional ou governamental.

No campo da física experimental, o cenário não era diferente. A preocupação com o desenvolvimento de novas tecnologias era incipiente. Ações esparsas e, muitas vezes, sem continuidade eram a regra. Aqui, também há as exceções. Por exemplo, o governo federal criou, em 1921, um centro de pesquisa dedicado ao estudo de combustíveis que se transformaria, na década seguinte, no atual Instituto Nacional de Tecnologia (INT).

Gross atuou no INT, entre meados da década de 1930 e as duas seguintes, quando, após um período em Viena (Áustria), de 1960 a 1967, como diretor da Divisão de Informação Científica da Agência Internacional de Energia



Henrique Morize



ARQUIVO HISTÓRIA DA CIÊNCIA - MAST

Bernhard Gross, em seu laboratório no Instituto Nacional de Tecnologia (INT), no Rio de Janeiro

Atômica, transferiu-se para São Carlos (SP), atendendo a convite do físico Sérgio Mascarenhas.

Gross veio ao Brasil por conta própria – é possível que a ascensão do nazismo tenha desempenhado algum papel nessa decisão. Ao chegar ao país, não tinha nenhum contato no meio acadêmico ou no governo. Depois de um curto período trabalhando – por conta própria com o tema da radiação cósmica, no qual havia iniciado sua carreira na Alemanha –, desenvolveu, já no INT, pesquisas sobre a condução de eletricidade em diferentes meios materiais.

Até sua ida para São Carlos, a interação de Gross com a universidade foi episódica: deu aulas na Universidade do Distrito Federal por três anos. Com a impossibilidade legal de manter dois empregos na esfera federal, optou por permanecer no INT a partir de 1938. Com isso, não teve como contribuir para a formação de muitos físicos, exceções brilhantes foram Joaquim da Costa Ribeiro (1906-1960) e Plínio Sussekind Rocha (1911-1972).

Wataghin teve um início diferente. Veio para a USP com um contrato de trabalho. Suas atividades, desde a chegada, podem ser descritas como as de um típico professor europeu: aulas, pesquisa e administração. A decisão de aceitar o convite de Ramos – que, à época, viajou à Europa para convencer pesquisadores a virem trabalhar na recém-fundada universidade paulista – teve muito a ver com a dificuldade de emprego na Itália naquele período. O físico ítalo-americano Enrico Fermi (1901-1954) convenceu Wataghin de que ele deveria tentar a vida em um local sem tradição, pois ali teria a chance de iniciar uma escola.

## SOLUÇÃO EXTERNA

Personalidade entusiasmada, Wataghin atraiu jovens brasileiros interessados em se dedicar à física. Entre eles, Marcello Damy de Souza Santos (1914-2009), Mário Schenberg (1914-1990), Paulus Aulus Pompéia (1911-1993) e Oscar Sala (1922-2010). E esse empenho teve papel relevante para a formação de pessoal e disseminação da pesquisa física como cultura – muito mais importante do que o apoio da recém-fundada universidade ou das esferas oficiais. Wataghin também representava algo que o país não tinha na área de física: o modelo de um cientista profissional.

Wataghin tinha consciência da importância de manter um constante intercâmbio, tanto com físicos brasileiros quanto estrangeiros. Assim, sempre que podia, participava das reuniões da Academia Brasileira de Ciências (ABC) e organizava seminários no Departamento de Física da USP. Em 1941, colaborou na realização de um importante seminário sobre raios cósmicos no Brasil, encontro do qual participou a equipe do norte-americano Arthur H. Compton (1892-1962), prêmio Nobel de Física de 1927. Em 1949, voltou para Itália, mantendo, no entanto, constantes contatos com o Brasil e fazendo visitas a seus colegas aqui.

Além disso, Wataghin sabia da importância de enviar jovens pesquisadores para o exterior, para estagiar em centros de pesquisa e tecnologia avançados. Aqueles jovens brasileiros foram para a Itália, Suíça, Inglaterra, França e os EUA. Nessas viagens, Wataghin os aconselhava a divulgar o que



*Palestra do físico Norman Hilberry, membro da expedição Compton. Sentados à mesa, Gleb Wataghin (2ª da esquerda para a direita); Arthur Compton (3ª). Na plateia, Giuseppe Occhialini (1ª fila, 2ª), Marcelo Damy (3ª). Ao fundo, Yolande Montoux, padre Francis Roser (mão no queixo) e, à direita deste, Bernhard Gross*

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS

estava sendo feito no Brasil. Além disso, aceitou receber, em 1937, no Brasil, o físico italiano Giuseppe Occhialini (1907-1993), o qual havia sido codescobridor do pósitron (antipartícula do elétron) em experimentos feitos no Reino Unido.

Opositor do fascismo e físico experimental considerado brilhante, Occhialini, que ficou no Brasil até 1944, teria papel fundamental nos eventos que levariam, cerca de 10 anos depois de sua chegada, aos feitos de maior repercussão da física brasileira até então: a descoberta do méson pi, partícula responsável pela força que mantém o núcleo atômico coeso.

Wataghin formou e liderou a equipe de jovens pesquisadores que produziu os trabalhos teóricos e experimentais que, pela primeira vez, deram visibilidade internacional à pesquisa em física no Brasil. Isso ocorreu no final da década de 1930 e início da seguinte, e dois desses resultados são os chuviscos penetrantes, fenômeno relativo à chegada de radiação cósmica à Terra, e o processo Urca, que explicava, por meio de partículas neutras e fugidias (neutrinos), a perda de energia em supernovas (estrelas que explodem no final da vida).

Mais tarde, no início da década de 1950, um quarto personagem iria se somar aos três citados na

abertura deste artigo. O físico austríaco Guido Beck (1903-1988) já havia estado aqui em 1947, na então Faculdade Nacional de Filosofia (FNFfi), da Universidade do Brasil, no Rio de Janeiro (RJ), e, no ano seguinte, na própria USP, para dar cursos e seminários.

Beck retornaria em definitivo ao país em 1951, como pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Física (CBPF), fundado dois anos antes no Rio de Janeiro (RJ). Permaneceria ali até 1955, quando retornaria à USP, por conta de um escândalo financeiro que havia abalado seriamente a continuação dos trabalhos no CBPF, pondo em dúvida a própria existência daquele centro de pesquisas. Antes do fim da década de 1950, Beck já estaria de volta ao Rio de Janeiro, por, entre outras coisas, desgostar daquele ambiente universitário e ter salários atrasados.

Inicialmente, para o lugar de Wataghin, havia sido convidado o norte-americano David Bohm (1917-1992), que, perseguido pelo macarthismo dos EUA, ficou pouco tempo no Brasil, por não se adaptar às condições de trabalho e ao clima do país. Vindo da Argentina, onde havia chegado em 1943, Beck era, assim, uma segunda tentativa de encontrar uma 'solução externa' para a física teórica da USP. Naquele momento, a volta de Schenberg da

Bélgica não pareceu ter sido suficiente para fortalecer as atividades dessa área no departamento de física. Pouco depois, foi convidado o físico tcheco Kurt Sitte (1910-1993) para ocupar a vaga teórica, mas ele ficou menos de dois anos (1953-1954).

Também no início da década de 1950, foi fundado, em São Paulo (SP), o Instituto de Física Teórica (IFT) – por iniciativa do engenheiro José Hugo Leal Ferreira (1900-1978) e seus dois filhos, ambos físicos, Paulo (1925-2005) e Jorge Leal Ferreira (1928-1995) –, com base em uma aliança com o alto escalão militar da época, interessado em questões nucleares.

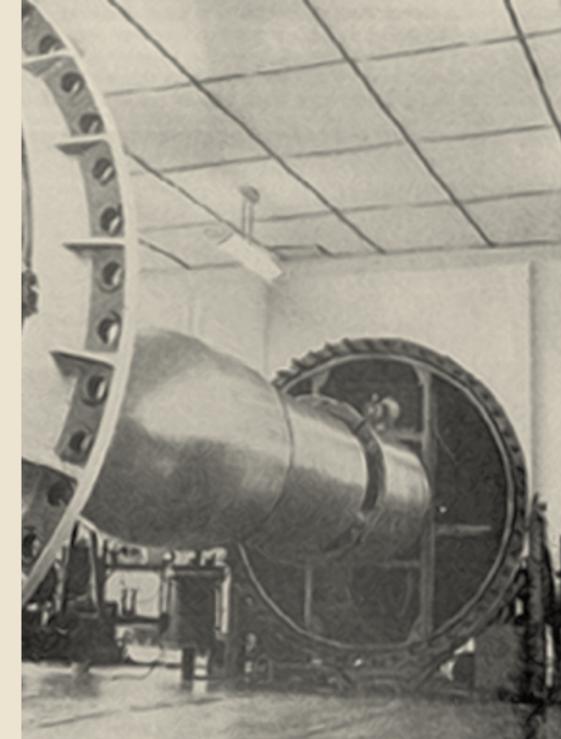
De certo modo, essa união de físicos e militares refletia o cenário internacional, dos mais propícios à física, então associada às bombas atômicas lançadas sobre o Japão. A física havia se tornado não só o foco da atenção pública, mas também quase um sinônimo de como a ciência poderia ter um papel político, econômico e social. Essa percepção de conhecimento (ou seja, ciência) como forma de poder foi um dos marcos da chamada Guerra Fria, isto é, das tensões permanentes entre os EUA e a então União Soviética e que só foram amenizadas com a fragmentação do bloco comunista.

Inicialmente, a partir de indicações feitas pelo físico alemão Werner Heisenberg (1900-1976) – a primeira opção dos Leal Ferreira para dirigir o IFT –, foram contratados físicos alemães para dirigir o novo instituto. Estes, apesar de muito ativos, acabaram vencidos por conflitos entre eles próprios.

Antes do final daquela década, os alemães foram substituídos por físicos japoneses na direção científica do IFT, os quais deixaram várias contribuições importantes – entre elas, o boletim (*Informação entre físicos*) que daria origem à *Revista Brasileira de Física* (hoje, *Brazilian Journal of Physics*).

## MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA

Em janeiro de 1949 – e tendo como estopim a participação decisiva do físico brasileiro César Lattes (1924-2005) na descoberta do méson pi em experimentos feitos na Inglaterra e nos EUA –, foi criado o CBPF, a partir, principalmente, da iniciativa do próprio Lattes, bem como de dois colegas teóricos, José Leite Lopes (1918-2006) e Jayme Tiomno (1920-2011).



*Van de Graaff do Instituto de Física da USP, no início da década de 1950*

AS CIÊNCIAS NO BRASIL, FERNANDO DE AZEVEDO (ORB)

Assim como se daria com o IFT, aqueles jovens físicos, para a concretização do projeto de fundação de um centro de pesquisas dedicado à física, souberam construir alianças com setores das forças armadas, bem como empresários, intelectuais e políticos. O ambiente nacional-desenvolvimentista à época foi muito relevante para a criação bem-sucedida do CBPF como uma sociedade civil – portanto, fora da universidade, considerada refratária à pesquisa.

Naquele momento – e com aquelas alianças com diversos setores da sociedade –, os físicos procuraram se mostrar capazes de elaborar, implementar e influenciar as políticas científicas locais e nacionais. Desse modo, almejavam ser percebidos como parceiros essenciais para o desenvolvimento nacional.

A repercussão na imprensa nacional e estrangeira dos feitos de Lattes, as alianças dos físicos com setores sociais, o reconhecimento de que conhecimento científico era uma forma de poder, a redemocratização do país e os ideais de desenvolvimento, estes foram alguns dos fatores que pavimentaram o caminho para que, no início da década de 1950, surgisse no país uma estrutura político-administrativa para a ciência. Dois casos emblemáticos são o então CNPq (hoje, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a Capes (hoje, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).



*Gleb Wataghin (esquerda),  
Bernhard Gross (centro) e  
Guido Beck, entrevistados  
por Amélia Império  
Hamburger*

Após a Segunda Guerra Mundial, o Brasil – como tantos outros países com ou sem tradição em ciência – viu-se na obrigação de criar ou reorganizar suas instituições científicas e de apoio à ciência (por exemplo, agências de financiamento). A prática da ciência após 1945 não seria mais aquela que havia predominado até então. A partir do fim do conflito, seria necessário angariar enormes recursos financeiros, logísticos, humanos, além de conexões com setores industriais, políticos e militares, para que a ciência e seus parceiros alcançassem os resultados pretendidos. Tudo deveria ser feito no menor prazo possível, para que a distância com relação aos países desenvolvidos não aumentasse a ponto de tornar o atraso definitivo.

No caso brasileiro, isso implicou a expansão da ciência para além do eixo Rio-São Paulo. O Brasil tentou acompanhar o ritmo de outros países, mas sem o necessário planejamento – aliás, planejar era algo que deveria ser aprendido também.

Na década de 1950, quatro locais ingressam no mapa da física brasileira, tentando acompanhar aquilo que já era visível em outras nações. Em ordem alfabética, Belo Horizonte, Porto Alegre, Recife e São Carlos.

Na primeira cidade, Francisco Assis Magalhães Gomes (1906-1990) – engenheiro formado pela Escola de Ouro Preto, mas muito interessado em física – organizou, com a ajuda de colegas, em 1953, o Instituto de Pesquisas Radioativas, criado no âmbito da hoje Universidade Federal de Minas Gerais e, mais tarde, com alguma resistência, anexo à Nuclebrás (Empresas Nucleares Brasileiras S/A). Outro cientista que procurou mudar as condições da pesquisa na capital mineira foi Ramayana Gazzinelli, depois de retornar em meados da década de 1960 do doutorado nos EUA.

Em Recife, o engenheiro Luiz Freire (1897-1963), atuante desde a década de 1920, atraiu para aquela capital, a partir dos anos 1950, professores estrangeiros, entre os quais portugueses, que lá permaneceram por anos e cuja principal contribuição ocorreu no campo da docência. A situação mudaria no início da década de 1970, quando um grupo de estudantes fazendo pós-graduação resolveu voltar para o Recife, capitaneados por um pesquisador com experiência para iniciar lá a pesquisa sistemática em física: Sergio Machado Rezende.

No Rio Grande do Sul, dois jovens físicos, Gerhard Jacob e Darcy Dillenburg (1930-2015), procuraram organizar um departamento de física teórica e, para isso, contrataram o físico holandês Theodor Maris (1920-2010). A partir de sua chegada, é criado um grupo ativo de pesquisa, que se dedica à física nuclear e à teoria quântica de campos – esta voltada para os fenômenos atômicos e subatômicos.

Outra ação importante – sobretudo, quando analisada em retrospecto – foi a ida, em meados da década de 1950, de Sérgio e Yvonne Mascarenhas para São Carlos (SP), onde criariam – praticamente, a partir do nada – um grupo de pesquisa em torno da física de estado sólido. Sérgio Mascarenhas havia sido discípulo e assistente de um dos pioneiros brasileiros da pesquisa em física, Costa Ribeiro, que trabalhava na então Faculdade Nacional de Filosofia, no Rio de Janeiro (RJ), e cujo nome está associado a um efeito na área de estado sólido (efeito Costa Ribeiro).

Em finais da década de 1950, o argentino Juan José Giambiagi (1924-1996), o ucraniano-mexicano Marcus Moshinski (1921-2009) e Leite Lopes criaram a Escola Latino-americana de Física, que se reunia periodicamente, quando as condições

políticas latino-americanas permitiam – o Brasil sediou duas dessas escolas, em 1960 e 1963. Esses encontros tiveram papel importante na integração da física latino-americana e estão na raiz da criação, no início da década de 1960, do Centro Latino-americano de Física (CLAF), com sede no CBPF.

Em 1962 – mesmo ano em que era fundado o CLAF –, surgia, na nova capital federal, a Universidade de Brasília (UnB), idealizada fundamentalmente por Anísio Teixeira (1900-1971) e Darcy Ribeiro (1922-1997). Projeto ambicioso, a UnB deveria revolucionar o ensino e a pesquisa em escala latino-americana.

Lideranças científicas no domínio da física, como Leite Lopes, Tiomno, Beck e Roberto Salmeron, envolveram-se no projeto e contribuíram para organizar o Instituto de Ciências. No entanto, o ideal da UnB não pôde ser concretizado: menos de dois anos depois, o golpe militar de 31 de março inviabilizaria a continuidade do projeto original, radicalmente comprometido com a democracia, o regime político-social que, segundo os idealizadores da UnB, possibilitaria a promoção do desenvolvimento pedagógico-científico no país.

## TEMPOS DE EXCEÇÃO

Uma inflação galopante adentrou a década de 1960, diminuindo drasticamente o poder aquisitivo dos brasileiros. Some-se a esse cenário econômico desfavorável o golpe civil-militar de março de 1964.

O que se seguiu ao regime militar levou as universidades e os centros de pesquisa a forçosamente conviverem com um tipo de cenário paradoxal. Poucos anos depois do golpe, começaram as perseguições políticas de professores e alunos, as quais alcançaram seu auge entre 1969 e 1972. Nesse período, físicos – e mesmo estudantes de física – foram cassados e afastados dos centros universitários.

Nesses anos, o ambiente, no país, tornou-se árido para a prática da pesquisa científica, dada a intervenção nas universidades, as perseguições de pesquisadores e o constante clima de repressão e controle. Entre os físicos, os teóricos parecem ter sido mais prejudicados, por causa das cassações de lideranças históricas, como Schenberg, Leite Lopes e Tiomno.

Já, entre os experimentais, os impactos parecem ter sido menos contundentes. E isso levou ao

surgimento de novas lideranças nacionais na área, como Fernando Zawislak e Sérgio Porto (1926-1979), para ficarmos em apenas dois nomes. Na USP, por exemplo, os aceleradores de partículas voltados para a pesquisa em física nuclear – instalados ali a partir da década de 1950 – mantiveram-se em atividade, e uma nova máquina, o Pelletron, foi inaugurada naquela universidade em 1972.

Damy – então grande nome na física experimental no país, integrante da primeira geração de físicos formada no Brasil – havia trabalhado em projetos militares (sonares para a Marinha brasileira) durante a Segunda Guerra e não foi cassado. Lattes, também experimental, então na Universidade Estadual de Campinas (SP), havia dado início, pouco antes do golpe, a um projeto de grande envergadura, a chamada Colaboração Brasil-Japão, e, durante a ditadura, não chegou a ser perseguido pelos militares – talvez, em razão de seu prestígio internacional ou do renome que ainda mantinha entre militares brasileiros por seus feitos do final da década de 1940.

No entanto, como um contraponto a esse cenário, surge, no país, no final da década de 1960, o sistema nacional de pós-graduação e crescem os mecanismos de financiamento à pesquisa – com a Finep passando a ser um ator relevante –, dois anseios antigos da classe científica.

Os físicos, de sua parte, souberam (ou tiveram que) se adaptar a esse cenário (ver nesta publicação ‘SBF: 50 anos de conquistas’). E, a ele, responderam com uma atitude igualmente ambígua: com oposição ao regime e às perseguições, mas também com a aceitação das verbas estatais e o apoio tanto à pós-graduação quanto à expansão do sistema nacional de universidades federais. E vale lembrar que parte dos físicos brasileiros participou – direta ou indiretamente – dos então grandes projetos de segurança nacional (energia, telecomunicações, armamentos, entre outros).

Para usar um termo caro aos físicos, essas forças de ação e reação, de oposição e adesão, perpassaram os cerca de 20 anos de regime militar. E, de certo modo, adentraram o regime democrático, a partir de meados da década de 1980, durante o qual os físicos souberam manter um diálogo constante – porém, nem sempre amistoso – com as esferas governamentais.

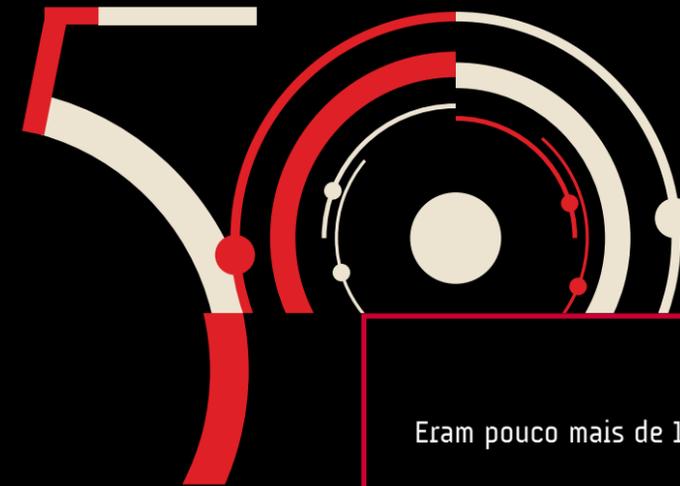
Mas estes últimos 50 anos fazem parte de uma história ainda por se escrever.

# SBF: 50 anos de conquistas

*Em defesa da pesquisa,  
do ensino e da formação  
de pesquisadores*

---

ANTONIO AUGUSTO PASSOS VIDEIRA  
*Departamento de Filosofia,  
Instituto de Filosofia e Ciências Humanas,  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro*



Eram pouco mais de 100 físicos e estudantes presentes à assembleia – reunida em Blumenau (SC), em 14 de julho de 1966 – que criaria a Sociedade Brasileira de Física (SBF).

Desde então, a SBF atravessou um regime de exceção e vivenciou a volta à democracia no país. Meio século depois, com cerca de 13 mil membros, mantém seus objetivos iniciais, como o de congregar a comunidade de físicos do país em defesa da pesquisa, do ensino e da formação de recursos humanos. E somou àqueles propósitos tantos outros, influenciada pelos anseios de seus membros, bem como pelo ambiente político, econômico e social.

A seguir, apresentamos um retrato conciso da evolução e do papel da SBF para a física e a ciência no Brasil.

# a

A Sociedade Brasileira de Física (SBF) foi criada em 14 de julho de 1966 – talvez, aproveitando-se de todo o simbolismo da data: a queda da Bastilha e o fim da monarquia absolutista na França, em 1789. Sua criação foi decidida na 18ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC) – o principal evento científico à época –, a qual ocorreu naquele ano em Blumenau (SC).

A assembleia que decidiu pela criação dessa nova sociedade reuniu pouco mais de uma centena de participantes, entre os quais estudantes. Nem todas as lideranças brasileiras em física estiveram presentes ao encontro.

Os objetivos iniciais da SBF eram: congregar os físicos e professores de física do Brasil; defender a liberdade de ensino e de pesquisa bem como os interesses e direitos dos físicos e professores da área; zelar pelo prestígio da ciência no país; estimular as pesquisas em física e a melhoria do ensino dessa ciência, em todos os níveis; organizar reuniões anuais de física e promover outros encontros científicos, congressos especializados, conferências, cursos etc. – inclusive com caráter de divulgação científica; editar publicações científicas, informativas e didáticas no campo da física; estimular o bom aproveitamento e a distribuição de pessoal científico na área, assim como o melhor planejamento na formação de especialistas necessários ao desenvolvimento do país. Esses são, ainda hoje, alguns dos mais relevantes propósitos da SBF.

A criação dessa sociedade atendia a um desejo antigo e nunca concretizado, devido, entre outros fatores, ao pequeno tamanho da comunidade de físicos.

Para alguns físicos – entre eles, o austríaco Guido Beck (1903-1988), que chegou ao Brasil no início da década de 1950 –, não fazia sentido criar uma sociedade profissional enquanto a física estivesse concentrada no eixo Rio-São Paulo. Aqueles poucos físicos podiam se reunir nas sessões da Academia Brasileira de Ciências e nas reuniões periódicas do



ARQUIVO HISTÓRIA DA CIÊNCIA (M&ST)

*Físicos na sede do então Conselho Nacional de Pesquisas (hoje, CNPq), por volta de 1960, para discutir divisão de verbas*

CNPq, então Conselho Nacional de Pesquisas (hoje, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Ainda que pequena, com pouco mais de 300 profissionais – o que não significa dizer que todos eram pesquisadores em física, pois muitos se dedicavam só à docência –, a comunidade brasileira de físicos, em 1966, já não se restringia às cidades do Rio e de São Paulo. Havia grupos de pesquisa e ensino em Belo Horizonte, Porto Alegre, São Carlos (SP), Brasília, Salvador e Recife.

A distribuição geográfica dos locais onde a física era praticada correspondia à realidade política, cultural e econômica do Brasil de então: concentração no eixo Sul-Sudeste, ampliada com as principais cidades do Nordeste. De certo modo, São Carlos era exceção. A existência de um núcleo de ensino e pesquisa em física devia-se, em parte, à ousadia de um jovem casal de cariocas, Sérgio e Yvonne Mascarenhas.

A comunidade de físicos era reduzida porque a física no Brasil era recente. Sua existência oficial, com sua inserção em departamentos universitários, começou em meados da década de 1930. Naquela altura, a fundação da Universidade de São Paulo (USP) e da Universidade do Distrito Federal (UDF) permitiu que fossem contratados os dois primeiros físicos profissionais, ambos estrangeiros e formados na Europa: o ítalo-ucraniano Gleb Wataghin (1899-1986) e o alemão Bernhard Gross (1905-2002).

Outro fator responsável pelo (pequeno) tamanho da comunidade foi o modelo econômico então vigente, que não favorecia a criação de tecnologias nacionais. Ao contrário: a ditadura civil-militar instaurada em março de 1964 preferia importar tecnologia, o que se dava, por exemplo, por meio da instalação de indústrias multinacionais em território brasileiro e as ‘caixas-pretas’ tecnológicas que essas empresas traziam consigo.

Os físicos brasileiros se consideravam pouco representados no governo federal e subaproveitados por ele. Além de não poderem contribuir – como era desejo de muitos – com o desenvolvimento do país, os físicos brasileiros não eram vistos como ‘plenamente confiáveis’ pelos militares, então detentores do poder.

Essa desconfiança ganhará uma resposta política contundente menos de três anos depois da criação da SBF.

## ANOS TURBULENTOS

Entre abril e maio de 1969, seis físicos foram cassados pela junta militar que governava o país após um tipo de duplo impedimento do governo do marechal Artur da Costa e Silva (1899-1969): este havia sofrido um derrame cerebral, e seu vice, o advogado Pedro Aleixo (1901-1975), sofria do 'defeito' de ser civil e de ter votado pela abstenção na reunião de 13 de dezembro de 1968, quando foi promulgado o Ato Institucional nº 5 (AI-5).

O AI-5 foi usado para cassar Plínio Sussekind Rocha (1911-1972), Mário Schenberg (1916-1990), José Leite Lopes (1918-2006), Jayme Tiomno (1920-2011), Elisa Frota-Pessôa e Sarah de Castro Barbosa. À exceção de Schenberg

ARQUIVO HISTÓRIA DA CIÊNCIA (MAST)



Bernhard Gross (sentado, à direita), Plínio Sussekind Rocha (em pé, à direita) e, ao lado deste, Joaquim da Costa Ribeiro, na Escola Politécnica do Rio de Janeiro, em meados da década de 1930

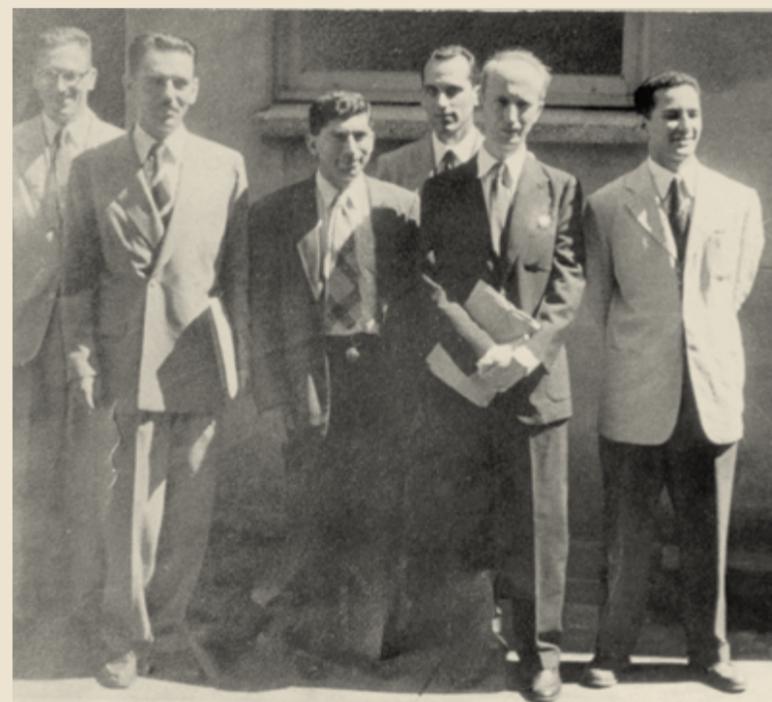
berg – professor da USP e cassado ainda em maio daquele ano, provavelmente por sua reconhecida militância comunista –, todos os outros atuavam no Rio de Janeiro: no Instituto de Física – cuja origem estava na Faculdade Nacional de Filosofia (FNFi) – da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), sucessora da Universidade do Brasil.

A rigor, essas cassações – muito diferentes entre si – ainda precisam ser devidamente explicadas. Penso que elas ocorreram pelo fato de serem lideranças científicas e intelectuais com estatura suficiente para se levantarem contra os projetos do governo, discriminatórios para a ciência do país.

Não devem ser descartadas razões internas à FNFi, uma vez que os cariocas sempre haviam se mostrado adversários do diretor daquela faculdade, o historiador Eremildo Vianna (1913-1998), notoriamente associado às forças policiais da ditadura militar da época.

Na SBF, as cassações significaram o esfacelamento da diretoria eleita pouco tempo antes. Leite Lopes, presidente, e Tiomno, vice, foram excluídos da vida científica e política do Brasil.

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS



Físicos teóricos do CBPF em meados da década de 1950 no Rio de Janeiro (RJ). Da esquerda para a direita, Juan José Giambiagi, Jayme Tiomno, Luiz Marquez, Samuel Macdowell, José Leite Lopes e Erasmo Ferreira



Mário Schenberg

ACERVO HISTÓRICO DO IFUSP

A SBF ainda tentou resistir. Para o biênio 1969-1971, reelegeu Leite Lopes e Tiomno para as mesmas funções. Este último, no entanto, repetiu sua decisão anterior: renunciar ao posto de vice-presidente. Dessa vez, seus colegas acatarem sua vontade, e Leite Lopes, já fora do país, manteve simbolicamente a presidência.

O verdadeiro responsável por manter a SBF ativa – obviamente, dentro do possível, dado o então cenário político – foi seu secretário-geral, Ernst Wolfgang Hamburger, que havia sucedido nesse posto outro paulista, José Goldemberg.

A escolha de físicos da USP para o cargo de secretário-geral pode ser explicada pelo fato de que a sede da SBF ficava naquela universidade – mais especificamente, no Instituto de Física –, e o secretário-geral era o responsável pelo dia a dia da sociedade.

Tiomno acabou sucedido pelo físico experimental carioca Alceu Pinho Filho, então professor da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), o qual já havia ocupado o cargo de secretário na diretoria provisória eleita em 1966, em Blumenau.

A escolha de Alceu Pinho – que seria presidente da SBF por dois mandatos (1971 a 1975) – mostra mais do que a visibilidade no cenário nacional do Departamento de Física da PUC-Rio. Revela, também, certa necessidade de a SBF manter uma interlocução com o regime, pois, à época, o novo



Elisa Frota-Pessôa

HTTP://CIJOVEM.MCT.GOV.BR/

sistema de pós-graduação era altamente dependente de financiamento estatal.

Apesar de certa predominância de físicos cariocas e paulistas, a diretoria da SBF incorporava pesquisadores de outros estados, de modo a refletir uma representatividade nacional para a instituição.

## ATITUDE ANTAGÔNICA

No início da década de 1970, a SBF criou um boletim para divulgar notícias de interesse dos físicos. Dado o cenário político de exceção, os primeiros números foram usados para noticiar as perseguições e os constrangimentos sofridos por cientistas brasileiros.

Com esse veículo, a SBF tornou-se, então, uma 'voz' de denúncia do ambiente político do governo do general Emílio Garrastazu Médici (1905-1985). Exemplo desse viés mais incisivo contra o regime foram as notícias relativas às demissões de físicos do Centro Brasileiro de Pes-



Alceu G. do Pinho, presidente da SBF de 1971 a 1975

quisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ). Em geral, essas denúncias eram acompanhadas de pedidos de revisão dos atos que levaram às perseguições – desnecessário dizer que eles não foram revogados.

Até meados da década de 1970, a estratégia da SBF teve um caráter duplo e, de certa forma, se concretizou por meio de uma atitude antagônica em relação ao sistema: por um lado, posicionou-se explicitamente contra as perseguições políticas de professores e estudantes; de outro, os físicos, por meio da SBF, demonstraram alguma adaptação às ‘regras do jogo’, ao reconhecerem que os governos militares procuravam organizar um sistema federal de apoio à ciência e à tecnologia, posto em prática por meio da distribuição de apoios financeiros e bolsas de estudos e pesquisa.

De sua parte, os militares – já no governo do general Ernesto Geisel (1907-1996) – sinalizaram com um arrefecimento da atitude em relação aos físicos, ao incorporar, por exemplo, o CBPF – então, uma sociedade civil – ao CNPq, em 1976, em meio a uma crise financeira gravíssima daquela instituição de pesquisa.

Apesar de, em sua maioria absoluta, ser opositora do então regime de exceção, a comunidade de físicos brasileira comportou-se pragmaticamente. O mesmo comportamento se deu pelo lado do governo, uma vez que este sabia que, sem a competência dos físicos, muitas de suas metas ligadas à chamada segurança nacional (energia nuclear, telecomunicações etc.) não poderiam ser alcançadas.

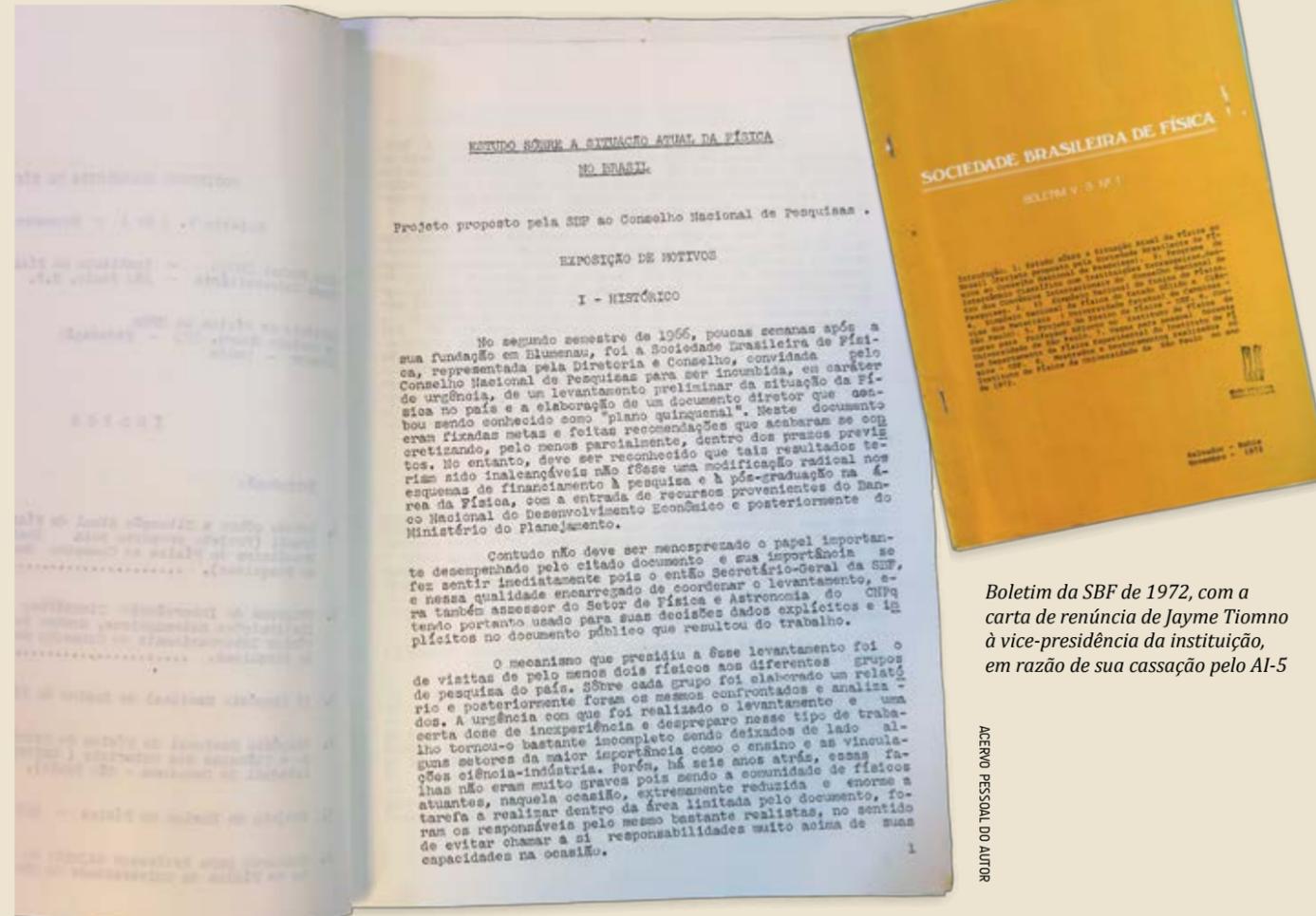
Sem a física, o sonho do ‘Brasil potência’ se enfraqueceria bastante – ou mesmo se tornaria inviável. Afinal, ao longo de todo o século passado, a física, em todo o mundo, cresceu graças ao apoio dado pelos governos e estados nacionais, que, após a Segunda Guerra e com o início da Guerra Fria, souberam reconhecer o poder político e econômico do conhecimento.

E o Brasil, nesse sentido, não foi exceção. Basta lembrar da aproximação entre físicos e militares logo depois do fim do conflito mundial, em uma aliança na qual os primeiros queriam estabelecer a pesquisa em física e o regime de dedicação integral nas universidades, e os últimos desejavam, por questões de segurança nacional e geopolíticas, o domínio do ciclo da energia nuclear.

Como resumiu um físico latino-americano que vivenciou o período: diferentemente do que parece ter ocorrido na Argentina e no Uruguai, o governo brasileiro tinha planos para os físicos do país, e estes, em alguma medida, aceitaram fazer parte deles.



Mesa-redonda com físicos no Instituto de Física da USP em 1984. Da esquerda para a direita, Sérgio Mascarenhas, Ernst Hamburger (em pé), Marcelo Damy, José Goldemberg e Oscar Sala



Boletim da SBF de 1972, com a carta de renúncia de Jayme Tiomno à vice-presidência da instituição, em razão de sua cassação pelo AI-5

ACERVO PESSOAL DO AUTOR

## INICIATIVAS IMPORTANTES

O início da década de 1970 também testemunhou duas iniciativas importantes da SBF: a criação da *Revista Brasileira de Física* (1971) – ainda hoje publicada com o título *Brazilian Journal of Physics* – e a organização dos Simpósios Nacionais de Ensino de Física (1970) – ver nesta publicação ‘As publicações da SBF’ e ‘Pesquisa em Ensino de Física’.

Essas ações exibem, com clareza, alguns dos valores abraçados pela SBF: a preocupação em garantir a autonomia da produção e divulgação da física feita no país e a defesa da reforma dos currículos oficiais desde o ensino médio até a universidade.

Se é certo que o governo Geisel representou um ligeiro abrandamento das perseguições políticas individuais, ela também significou um duro golpe para as pretensões da comunidade de físicos em uma área científica que tinha raízes históricas no país: em 1975, o governo assinou um acordo com a então

Alemanha Ocidental para a construção de usinas nucleares com tecnologia fornecida por aquele país, sem praticamente a participação da comunidade nacional nessa iniciativa.

## QUESTÕES NACIONAIS

A SBF começou, então, um massivo movimento de crítica a essa decisão. Isso se deu, principalmente, por meio das páginas de seu boletim. A reação dos físicos não impediu a construção das usinas na região sul do litoral fluminense. No entanto, vale ressaltar que, em 1984, a SBF teve papel fundamental em determinar o uso pacífico da energia nuclear no país, por meio de

uma moção assinada com sua congênere argentina, a Asociación Física Argentina (AFA).

Com o crescimento quantitativo da comunidade – ao mesmo tempo que novas áreas de pesquisa eram implementadas –, a SBF decidiu, ao final daquela década, patrocinar a organização de reuniões temáticas. Esses encontros aconteciam nas estâncias hidromineiras mineiras, enquanto as reuniões da SBPC permaneciam como espaço para a discussão de temas de escopo nacional.

Ao longo da década de 1980, a SBF continuou a se posicionar frente aos problemas nacionais, como em relação à diminuição das verbas para a pesquisa e o ensino.

Tais protestos eram acompanhados de reivindicações em favor de uma maior participação dos cientistas brasileiros nas decisões governamentais para a ciência e tecnologia – os físicos brasileiros continuavam a se considerar como pouco ouvidos pelo governo federal.

Graças, principalmente, aos programas de pós-graduação implementados a partir do início da década de 1970, a física brasileira pôde crescer razoavelmente. Para acompanhar e influenciar nesse processo, a SBF, ao longo da segunda metade daquela década, deu início a uma prática sistemática para obter informações (quantitativas e qualitativas) sobre sua comunidade. Essa prática foi importante para consolidar o caráter nacional da SBF, além de servir de modelo para ações similares de outras sociedades e até de órgãos governamentais, como o CNPq.

Em 1987, a SBF publicou um estudo detalhado e rigoroso da área. Vale lembrar que essa publicação não foi encomendada pelo governo. Essa foi mais

uma iniciativa dos físicos brasileiros no sentido de defender e preservar sua autonomia.

## VOLTA À DEMOCRACIA

Com a extinção oficial, em 1978, do AI-5, os físicos cassados – com exceção de Sussekind Rocha, que havia morrido em 1972 – puderam voltar às suas instituições de origem, mas em um ambiente político e acadêmico bem diferente daquele pré-1968.

Com o retorno formal à democracia, em março de 1985, a SBF viu uma antiga reivindicação sua se concretizar: a criação de um ministério de Ciência e Tecnologia, órgão que, 20 anos depois, seria ocupado, no governo Lula, por um de seus membros: Sérgio Machado Rezende.

O crescimento e a complexidade da comunidade de físicos levou a SBF a ampliar seus objetivos e suas metas. Por exemplo, participação de físicos na indústria nacional e regulamentação da profissão de físico – hoje, aprovada parcialmente no Congresso Nacional.

Entre as realizações promovidas a partir do final do século passado, podem ser mencionadas a criação de um plano de saúde para seus associados e familiares (ver nesta publicação ‘O que a SBF tem feito pelos físicos’); a substituição do antigo boletim em papel por uma edição eletrônica; a organização de olimpíadas nacionais de física (ver nesta publicação ‘As Olim-



Participantes do 1º Simpósio Nacional de Física do Estado Sólido e Ciência dos Materiais, em 1971. Sérgio Rezende (à esquerda) e, ao lado deste, Sérgio Mascarenhas



ACERVO SBF

Sede atual da SBF, na USP

piadas de Física da SBF); a criação das escolas de física Jorge André Swieca; e a publicação de um portal na internet.

Uma palavra final e pessoal. Os parágrafos até aqui não reproduzem, de modo amplo, a história da Sociedade Brasileira de Física. Ela é certamente muito mais rica e interessante do que foi exposto neste espaço conciso. Mas é certo também que ela permanece incompleta e, portanto, precisa ser mais bem estudada.

Anos atrás, pude contribuir para a criação de um grupo de trabalho de preservação da memória da física no Brasil, o qual, por razões diversas, acabou não implementado. Agora, já é tempo de dar vida a iniciativa semelhante. Desta vez, porém, dedicada a conhecer com mais detalhes a história dessa organização de classe que completa respeitáveis 50 anos.



# A física no Brasil em números\*

\* A versão completa deste documento está disponível em formato PDF em [www.sbfisica.org.br/v1/arquivos\\_diversos/publicacoes/os-numeros-da-fisica-no-Brasil-hoje.pdf](http://www.sbfisica.org.br/v1/arquivos_diversos/publicacoes/os-numeros-da-fisica-no-Brasil-hoje.pdf)

## Breve panorama da produção científica da área nas últimas décadas

PETER SCHULZ

Faculdade de Ciência Aplicadas,  
Universidade Estadual de Campinas (SP)

# n

No período de 1996 a 2014, o grupo de pesquisa em indicadores científicos Scimago contabilizou um total de 75.962 artigos – com a presença de pelo menos um endereço brasileiro associado aos autores – nas 10 categorias na área de física. No mesmo período, seguindo esse mesmo critério, a base

Web of Science (WoS) listou 46.888 documentos em suas oito categorias da física (figura 1).

É interessante confrontar esses dados com a produção assinalada no Relatório de avaliação trienal, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), nas áreas de física e astronomia para o triênio 2010-2012: são 11.868 artigos cientí-

cos em revistas indexadas. Trata-se da produção ligada aos programas de pós-graduação no país. Segundo dados extraídos do Scimago – para esse mesmo período e mesmas áreas –, aparecem 15.948 artigos científicos – ou seja, 34% a mais.

Mesmo levando em conta possíveis inconsistências na comparação dos dois conjuntos de artigos, esse é um indício de que, apesar de a maioria da produção científica em física (cerca de 2/3 dela) ainda estar associada a programas de pós-graduação, uma produção considerável é oriunda de: i) instituições não diretamente ligadas ao ensino; ou ii) departamentos ligados a outras áreas do conhecimento (engenharias, por exemplo).

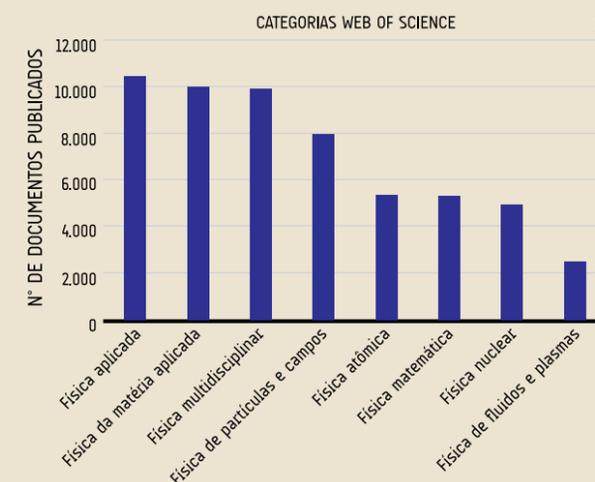
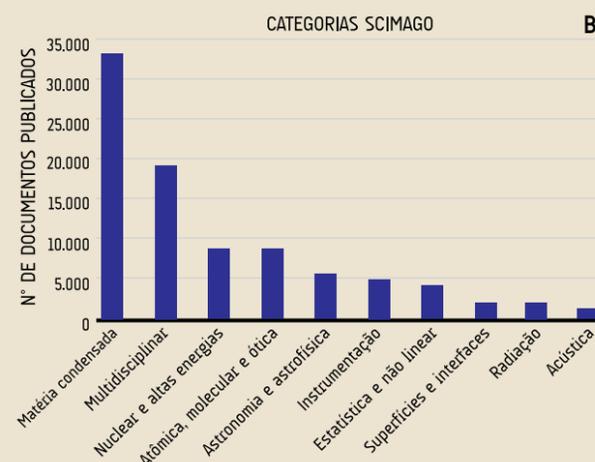
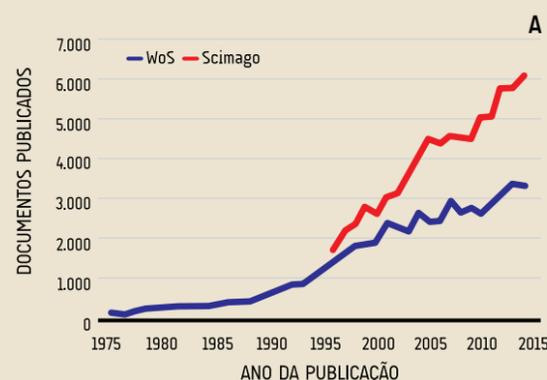
## PARTICIPAÇÃO BRASILEIRA

Segundo dados da base Scopus, do Scimago, a participação do Brasil na produção científica mundial – considerando-se todas as áreas do conhecimento – cresceu, no período de 1996 a 2014, mais acentuadamente do que a da física brasileira. Uma das razões para isso foi a incorporação de novas revistas nacionais (de outras áreas) na base Scopus.

Em relação à física, a participação brasileira na produção científica mundial é ainda modesta (pouco mais de 2%), apesar do salto no número absoluto de documentos publicados no período (1996-2014), como mostra a (figura 2).

No entanto, como indicam dados também da Scopus, a coautoria internacional em física é sistematicamente maior do que a porcentagem verificada ao se computarem todas as outras áreas da produção científica no Brasil no período 1996-2014 (figura 3).

Figura 1. Em A, produção científica brasileira em física (com presença de pelo menos um endereço brasileiro associado aos autores), em duas plataformas de dados bibliométricos distintas (Scimago e Web of Science), com ênfase no período 1996-2014. Em B, número de documentos com endereços brasileiros por categoria (subárea), segundo a Scimago. Em C, segundo a Web of Science



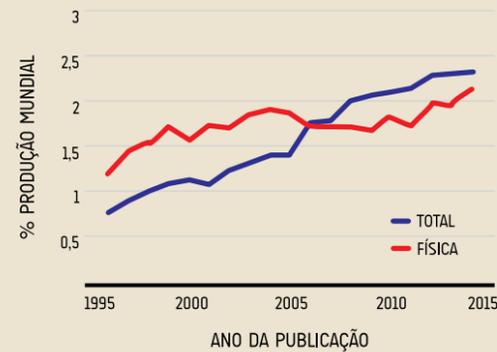


Figura 2. Participação do Brasil na produção científica geral mundial, em comparação, no mesmo período (1996-2014), com o aumento da participação brasileira na produção científica mundial em física

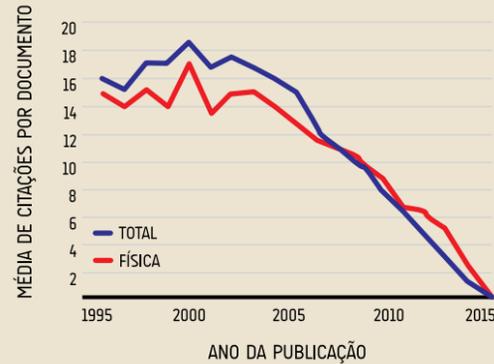


Figura 4. Número médio de citações por artigo em física comparado, para o período 1996-2007, com o do total geral da produção científica brasileira no mesmo período. A inversão recente deve-se, em grande medida, ao impacto da participação nas grandes colaborações em física de altas energias

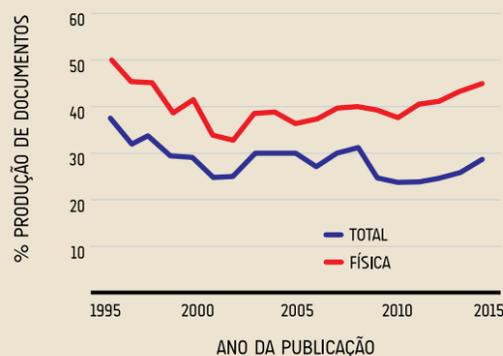


Figura 3. Percentual de documentos em coautoria internacional em física, comparado com o de todas as áreas da produção científica no Brasil, no período de 1996 a 2014, segundo dados da Scimago

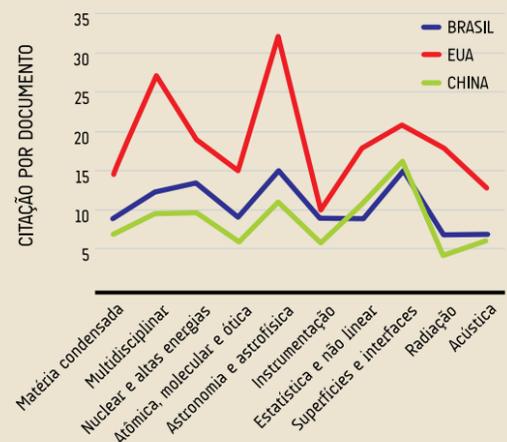


Figura 5. Número de citações por documento para as 10 categorias consideradas pela plataforma Scimago, comparando a produção brasileira com a dos EUA e da China

## CITAÇÕES E DOUTORES

O número médio de citações por artigo para os documentos em física produzidos no Brasil (pelo menos, um endereço brasileiro associado aos autores) é ligeiramente menor do que aquele atribuído ao total da produção científica brasileira para o mesmo período (1996 a 2007). Essa diferença é relativizada se levarmos em conta o peso da produção e da prática de citações para diferentes áreas do conhecimento. Para o período 1996-2014, a média de citações para os 75.962 artigos em física é de 10,95, enquanto, na área de medicina, temos 171.981 artigos, com uma média de 12,88 citações por artigo. A inversão recente, conforme mostra a figura 4, deve-se, em grande medi-

da, ao impacto da participação nas grandes colaborações em física de altas energias.

Quando comparamos o número de citações por documento para as 10 categorias consideradas pelo Scimago, vemos que a produção científica em física no Brasil tem, por exemplo, números superiores aos da China, mas inferiores aos dos EUA (figura 5).

Estima-se que haja hoje no Brasil entre 4 mil e 7 mil doutores em física, com a maioria deles ainda alocada no ensino superior

público (cerca de 2,5 mil), segundo o painel extraído da Plataforma Lattes. Nos últimos 10 anos, a formação de doutores em física no país tem crescido de modo significativo, e, atualmente, formam-se cerca de 250 deles por ano (figura 6A), também de acordo com o painel Lattes. Esses números, no entanto, são inferiores a outras estimativas e dados da avaliação da Capes.

É provável que a presença de doutores no setor empresarial privado esteja subestimada, dada a hipótese de que muitos currículos da Plataforma Lattes provavelmente estejam desatualizados em relação ao endereço desses doutores, caso a atividade deles não esteja mais vinculada à captação de recursos junto às agências de fomento usuais (figura 6B).

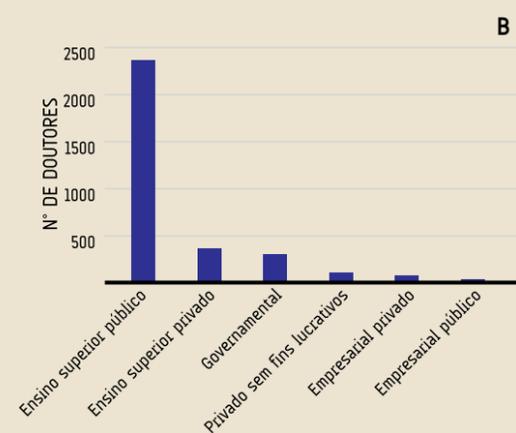
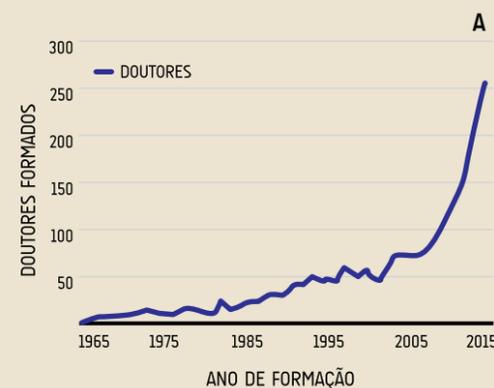


Figura 6. Em A, formação de doutores em física em função do ano de formação, segundo o painel extraído da Plataforma Lattes. Em B, distribuição de doutores em física por setor econômico, segundo o painel da Plataforma Lattes (2014)

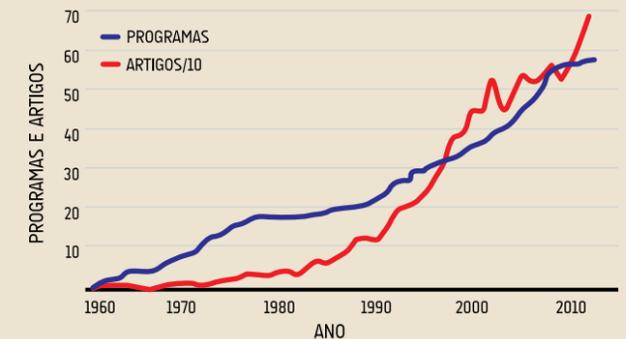


Figura 7. Comparação entre o número de programas de pós-graduação e de artigos científicos produzidos no Brasil nos últimos cerca de 50 anos, com base em dados extraídos da plataforma APS Journals Archive

## ALGUMAS CONCLUSÕES

Os marcos institucionais da ciência no Brasil no final da década de 1940 e início da seguinte – a fundação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, em 1949; a criação, em 1951, tanto do hoje Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) quanto da Capes; e a fundação, no mesmo ano, do Instituto de Física Teórica –, aliados ao surgimento dos primeiros programas de pós-graduação no país no início da década de 1960, tiveram pouco impacto na produção científica propriamente dita (figura 7).

Esse cenário começou a se modificar apenas a partir de meados da década de 1970, quando foi aprovado o 1º Plano Nacional de Pós-graduação. Na mesma época, a Sociedade Brasileira de Física (SBF) passou a promover os primeiros grandes Encontros Nacionais, que constituíram fóruns importantes para a consolidação da atividade de pesquisa nas diferentes subáreas da física. A produção científica brasileira em física é mais internacionalizada que a média brasileira, levando em conta todas as áreas do conhecimento. No cenário interno, as publicações da SBF dão visibilidade à pesquisa desenvolvida em espaços emergentes e distantes dos grandes centros.

Desde a criação da SBF, a física no Brasil estabeleceu-se como uma área do conhecimento consolidada, com uma rede de formação de doutores disseminada pelo país e indicadores significativos quanto à produção de artigos científicos. No entanto, alguns desafios colocam-se nesse cenário: o impacto dessa produção de artigos é ainda relativamente baixo, bem como é baixa a atividade de pesquisa fora do âmbito das instituições de ensino públicas.

# O que a física tem feito por você

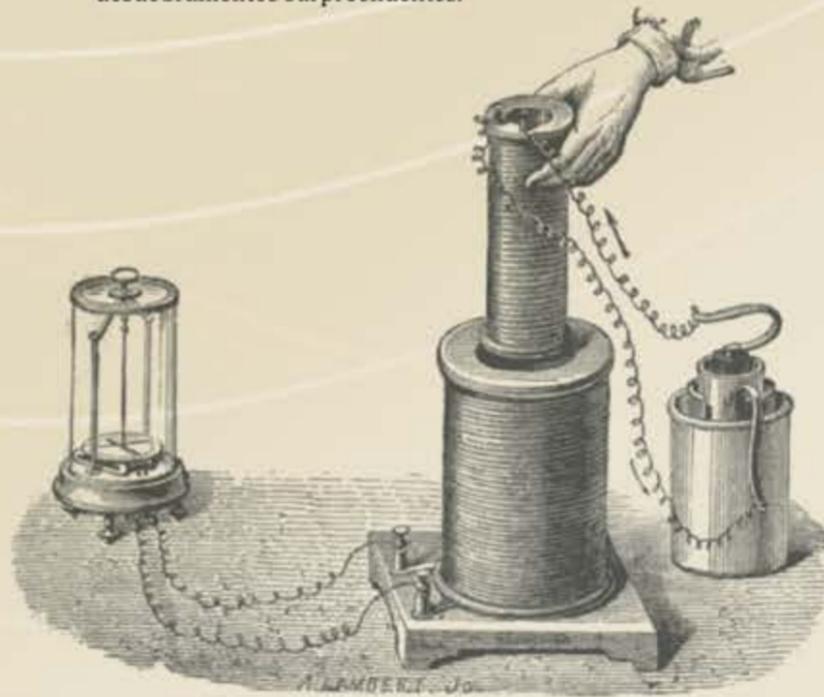
'Para que serve isso?';  
'Por que gastar bilhões para construir um equipamento que irá descobrir uma partícula que não serve para nada?'; 'Há sentido em gastar tanto dinheiro em ciência se há tantos problemas no planeta?'

Sem dúvida, perguntas pertinentes – principalmente, se feitas por quem paga impostos e (direta ou indiretamente) subsidia a pesquisa científica.

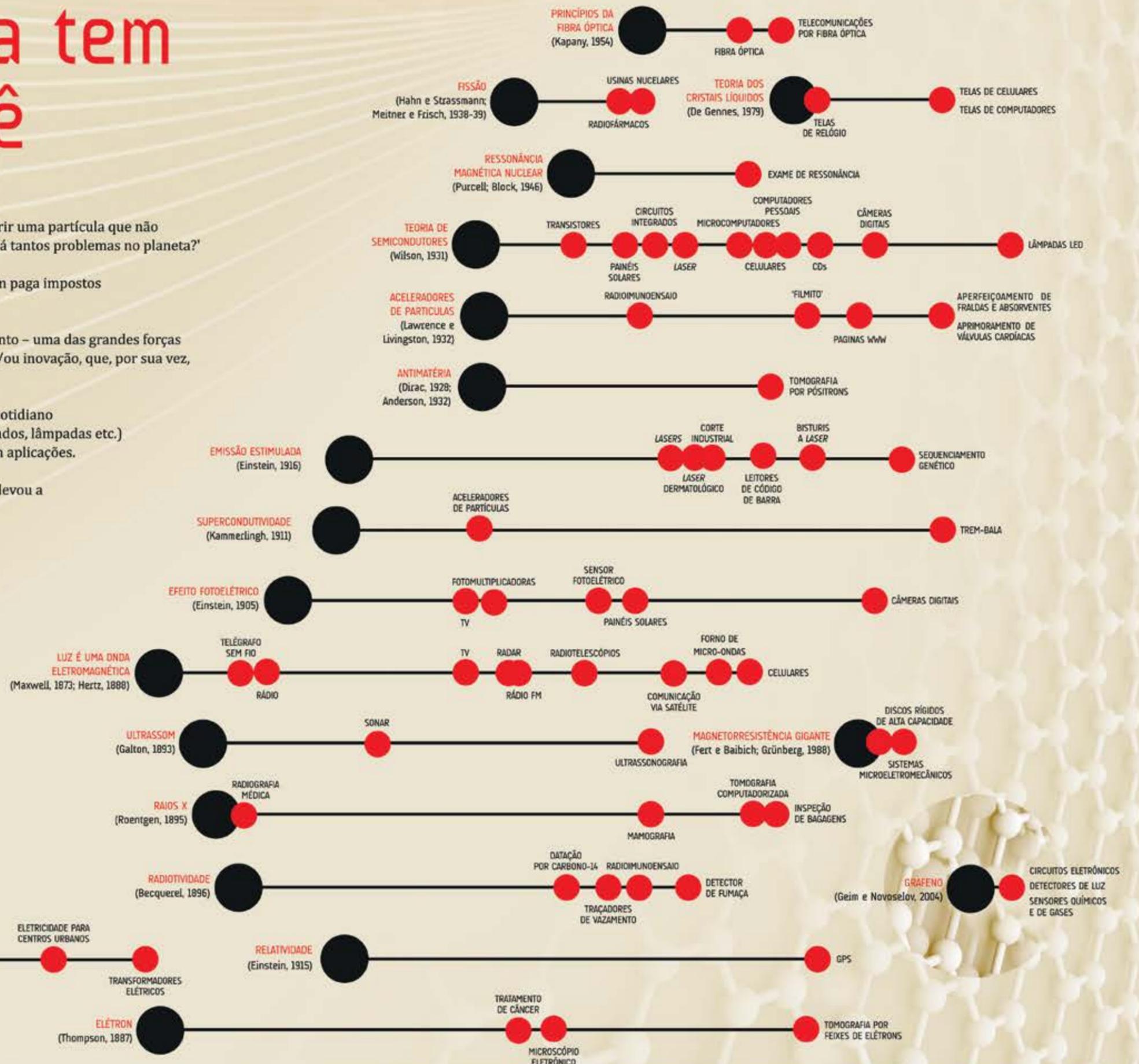
Uma resposta para essas questões poderia ser: ciência gera conhecimento – uma das grandes forças motrizes da humanidade –, o qual, não raramente, produz tecnologia e/ou inovação, que, por sua vez, podem trazer bem-estar para a população e riqueza para as nações.

Hoje, grande parte dos equipamentos e serviços que permeiam nosso cotidiano (internet, computadores, celulares, GPS, carros, aviões, ares-condicionados, lâmpadas etc.) está repleta de resultados de física básica que, inicialmente, não tinham aplicações.

Alguns exemplos de como a tentativa de entender fenômenos naturais levou a desdobramentos surpreendentes.



INDUÇÃO MAGNÉTICA (Faraday, 1831; Henry, 1832)



1800

1850

1900

1950

2000



# FRONTEIRAS DA FÍSICA



# Óptica e fotônica

*A luz a serviço da ciência,  
tecnologia e do bem-estar social*

Tocado-  
res de CD e DVD, 'cane-  
tas' *laser*, GPSs, leitores ópticos,  
bisturis ultraprecisos, relógios impensa-  
velmente pontuais, monitoramento do clima, li-  
gações telefônicas, comunicação pela internet, fa-  
bricação de microprocessadores... Um dos denominadores  
comuns dessa lista de tecnologias e equipamentos de nosso  
cotidiano é um fenômeno físico corriqueiro: a luz.

Em cada um desses avanços, estão – ainda que de forma sub-  
liminar – resultados da pesquisa em óptica e fotônica, área da  
física que conseguiu não só entender a natureza mais íntima da  
luz, mas também – principalmente, nas últimas décadas – iso-  
lar, estudar e controlar as unidades básicas que a formam.  
Dessas linhas de pesquisa, tem surgido o conhecimento  
que alicerça desdobramentos importantíssimos para  
a melhoria da qualidade de vida das populações.

E esses impactos na sociedade tendem a  
crescer neste século.

CID B. DE ARAÚJO  
*Departamento de Física,  
Universidade Federal de Pernambuco*



A luz que vem do Sol possibilita a vida por meio da fotossíntese e, sendo central para as atividades humanas, ela sempre despertou em filósofos e cientistas o desejo de entender sua natureza. Ao longo dos séculos, duas grandes linhas de pensamento se alternaram: para alguns, a luz seria formada por partículas, enquanto outra corrente acreditava ser ela composta por ondas.

Na Grécia antiga, Euclides de Alexandria (360 a.C.-295 a.C.) escreveu, há cerca de 2,3 mil anos, sobre a geometria da visão, embora não dispusesse de nenhum modelo teórico para explicar o comportamento da luz.

Vários grandes cientistas se dedicaram ao estudo da natureza da luz, desvendando vários de seus atributos. Entre eles, estão Ibn al-Haytham (965-1040) – considerado o pai da óptica moderna –, o italiano Galileu Galilei (1564-1642), o inglês Isaac Newton (1642-1727), o francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827), o escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) e os alemães Heinrich Hertz (1857-1894), Max Planck (1858-1947) e Albert Einstein (1879-1955).

Atualmente, sabemos que a luz é uma forma de energia que se comporta como onda ou como partículas – estas denominadas fótons. A luz, em suas várias formas, compreende todo o espectro eletromagnético, que vai dos raios gama e raios X, as radiações eletromagnéticas mais energéticas, até as micro-ondas e ondas de rádio. Entretanto, só uma pequena parte do espectro é captada pelo olho humano: o espectro visível.

Os conhecimentos científicos adquiridos pela humanidade continuam evoluindo e compõem hoje a área da física chamada óptica. A descrição da luz como fótons tem sido fundamental para melhor entendimento da mecânica quântica.

Com o passar dos anos, os conhecimentos adquiridos sobre a natureza e o comportamento da luz possibilitaram vários desdobramentos científicos e tecnológicos. Uma subárea que se desenvolveu foi a fotônica – tecnologia de geração, emissão, transmissão, modulação, processamento, amplificação e detecção da luz. Toda vez que alguém faz uma ligação telefônica, escuta um CD ou consulta o preço de um produto no leitor de código de barras no supermercado, ela utiliza a luz e, portanto, beneficia-se do desenvolvimento da fotônica.

De fato, nós nos beneficiamos da fotônica o tempo todo, embora nem sempre nos lembremos disso. A fotônica possibilita aplicações tão variadas como em comunicações via internet, no monitoramento do clima, em vários procedimentos médico-hospitalares (tomografia óptica e cirurgias de correção de córneas com *lasers*) e na fabricação dos circuitos integrados para computadores.

Sem os conhecimentos da óptica e fotônica, não seríamos capazes de mapear nosso universo, criar filmes em 3D, controlar a qualidade de medicamentos e alimentos na indústria, além de várias outras ações. O Google Earth, por exemplo, não seria possível sem o GPS (sigla, em inglês, para Sistema de Posicionamento Global), que funciona com base em relógios ópticos altamente precisos.

Em outra escala observacional, o mapeamento do universo é feito com o uso de telescópios na Terra ou em órbita interestelar, como o telescópio Hubble. Esses equipamentos usam espelhos e lentes para focalizar a luz em câmeras, bem como sensores ópticos e espectrógrafos – estes últimos para estudar a composição da matéria por

meio das ‘cores’ (frequências ópticas) que ela emite. E essas observações são convertidas em sinais transmitidos para análise na Terra.

Em resumo, a óptica e a fotônica estão incorporadas à nossa vida diária e desempenham um papel crucial para a construção do futuro.

## BRASIL: BREVE HISTÓRIA

Na década de 1950, na Universidade de São Paulo (USP), foram iniciadas pesquisas teóricas sobre os fundamentos da interação luz-matéria e experimentais, cujo objetivo era identificar a composição química e estrutural de compostos orgânicos e inorgânicos por meio de uma técnica de análise dessas propriedades denominada espalhamento Raman. À época, as fontes de luz usadas para esse propósito eram lâmpadas de variados tipos. Com a construção do *laser*, em 1960, o interesse pela óptica ganhou grande impulso no exterior – e também no Brasil.

No final da década de 1960, foi construído o primeiro *laser* de HeNe (hélio-neônio) no Brasil – isso ocorreu em Porto Alegre. No início da década seguinte, foram implantados laboratórios equipados com *lasers* na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), ambos em São José dos Campos (SP).

Na Unicamp, havia grande interesse no estudo de propriedades ópticas de semicondutores, enquanto, em São José dos Campos, o foco das pesquisas era o uso de *lasers* para diversas aplicações, como a separação de isótopos (elementos químicos com mesmo número de prótons, mas diferente número de nêutrons) radioativos.

Em 1971, formou-se o grupo de pesquisa da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), no Recife, que tinha como um dos objetivos o estudo da óptica de sólidos magnéticos, e, entre 1977 e 1978, criou-se ali o grupo de óptica não linear, que desde a sua criação até o presente desenvolve pesquisas em sólidos, líquidos e gases. Em 1984, surgiu o grupo de óptica da USP, em São Carlos, com interesse na pesquisa em física atômica e cristais dielétricos (isolantes que, em casos especiais, sob a ação de campo elétrico externo, permitem a passagem de corrente elétrica). Também, na década de 1980, foi dado passo importante com a implantação de um laboratório de crescimento de cristais para uso em *lasers* no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em São Paulo (SP).

Dois outros fatos marcantes no desenvolvimento da óptica e fotônica no Brasil foram: i) a instalação, na Unicamp, dos grupos de fibra óptica e de *lasers* de semicondutores, que deram contribuição muito importante para a implantação das comunicações ópticas no país; ii) a instalação, na década de 1990, dos grupos de óptica quântica das universidades federais do Rio de Janeiro (UFRJ) e de Minas Gerais (UFMG), que têm produzido trabalhos de grande relevância.

Em 1985, foi fundada a empresa Optoeletrônica, resultado do esforço de professores e técnicos do Instituto de Física da USP, de São Carlos. Essa empresa lançou o *laser* de HeNe como seu primeiro produto, tendo posteriormente produzido outros equipamentos, como o primeiro leitor de código de barras fabricado no país, equipamentos médico-oftalmológicos e militares de alta tecnologia.

Empresas especializadas em instrumentação óptica (fibras, sensores, moduladores e emissores de luz, conectores ópticos e instrumentos de medição) foram criadas nas três últimas décadas.

Atualmente, existem vários grupos de pesquisa em todas as regiões do Brasil, com atuação numa grande variedade de subáreas: *lasers* e instrumentação óptica, óptica não linear, óptica e informação quântica, novos materiais fotônicos, biofotônica e aplicações médicas, métodos ópticos em física atômica e molecular, comunicações ópticas e metrologia científica, entre outras. Estima-se que, no Brasil, cerca de 600 pesquisadores atuem nessas subáreas em centros universitários e institutos de pesquisa.

Há 28 anos, a Sociedade Brasileira de Física (SBF) vem promovendo a Escola Jorge André Swieca de Óptica Quântica e Óptica Não Linear, que, este ano, terá a 15ª edição. Essa escola tem o importante papel de complementar a formação de pesquisadores por oferecer cursos especializados normalmente inexistentes nos programas de pós-graduação.

Nos últimos anos, cresceu consideravelmente o número de congressos científicos nacionais e internacionais em óptica e fotônica no Brasil. Esses eventos têm contribuído para aproximar os grupos de pesquisa, e observa-se, atualmente, um número crescente de publicações científicas envolvendo grupos nacionais e internacionais.

Cinco Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCTs) atuando em óptica e fotônica têm sido apoiados pelo então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) com participantes de todas as regiões do país.

## DESAFIOS E NOVOS HORIZONTES

Apesar da avaliação positiva que pode ser feita com relação às atividades em óptica e fotônica no Brasil nos últimos 50 anos, falta muito para que o país se torne um importante ator internacional. Nos países centrais, essa área evoluiu mais rapidamente do que aqui, devido tanto aos investimentos de maior porte feitos nas universidades e nos centros de pesquisa quanto ao desenvolvimento industrial daqueles países.

Faltam, no Brasil, mais cientistas, engenheiros ópticos e técnicos de nível médio, capacitados para trabalhar com equipamentos sofisticados e técnicas de fronteira. O volume da pesquisa feita no país ainda é pequeno, embora seja possível identificar trabalhos de alto nível produzidos aqui.

Do ponto de vista científico, é necessário um maior esforço em áreas de grande competição internacional, como nano-óptica, óptica e fotônica não linear, plasmônica, optomecânica na escala nanométrica, informação quântica, neurofotônica, optofluidica e biofotônica. Também têm sido muito tímidas as iniciativas, no Brasil, em pesquisas usando luz e relacionadas com energia, agricultura, meio ambiente e climatologia. Aplicações da óptica e fotônica nessas áreas terão, no futuro, consequências importantíssimas para a melhoria da qualidade de vida das populações.

No Brasil, são necessários maiores investimentos na área industrial a exemplo do que ocorre em outros países. É bem significativo o investimento feito nos EUA dentro do programa NPI (sigla, em inglês, para Iniciativa Nacional em Fotônica). Ano passado, começou a ser implantado o AIM Photonics (Instituto Norte-Americano para a Produção de Fotônica Integrada), parceria público-privada, com previsão de US\$ 610 milhões, que visa aumentar a capacidade de tecnologia fotônica na escala submícron (abaixo do milionésimo de metro) e nanométrica (bilionésimo de metro).

Na Europa, a parceria público-privada Photonics 21, dentro do programa Horizon 2020, está ganhando mais força com a adesão de várias empresas e novos investimentos. Programas como esses servem para preencher a lacuna existente entre inovação e comercialização e, certamente, darão origem a novas tecnologias fotônicas.

No Brasil, os órgãos governamentais reconhecem a necessidade de maior interação universidade-empresa, mas as ações para estimular essa interação são pouco expressivas quando comparadas às iniciativas existentes em outros países.

## PERSPECTIVAS

Enquanto o século passado foi o 'século do elétron', este é o 'século do fóton'. O controle da propagação da luz através de malhas ópticas (*optical networks*) está revolucionando a tecnologia da informação. A maior capacidade de tratamento de informações permitirá, por exemplo, o domínio da produção de moléculas adequadas para controle de processos químicos relacionados com a terapia de doenças, novas tecnologias industriais e novos avanços na fronteira da ciência e da tecnologia.

Nos últimos 50 anos, foi criada, no Brasil, uma infraestrutura mínima em termos de instalações e recursos humanos que pode permitir ao país almejar posição significativa em óptica e fotônica no futuro. Os grupos existentes têm produzido contribuições científicas importantes e formado novos pesquisadores em número compatível com o número de pesquisadores-orientadores existentes, mas essa quantidade é ainda muito pequena. É preciso crescer a escala das atividades na área.

Os próximos anos vão requerer um grande esforço se quisermos acompanhar as fronteiras científicas e tecnológicas e almejarmos liderança em algumas dessas fronteiras. Portanto, será muito importante que os investimentos em óptica e fotônica cresçam para que o país consiga formar recursos humanos em maior número e mais bem qualificados; promover a atração para o país de cientistas e técnicos vindos de boas instituições de pesquisa dos países desenvolvidos; e adquirir a capacidade de desenvolver instrumentação e tecnologias fotônicas de fronteira.

A óptica e fotônica terá um impacto crescente na vida das pessoas, favorecendo oportunidades para um crescimento global explosivo, com maior interatividade entre as nações, graças aos progressos já realizados e às perspectivas decorrentes dos avanços científicos e tecnológicos. A escassez de recursos para financiamento da área certamente comprometerá o futuro do Brasil.

# Física estatística e computacional

*Conceitos e ferramentas para entender o comportamento coletivo da matéria*

A física estatística permeia a compreensão do mundo à nossa volta de forma muito abrangente. Usando as regras da física do mundo microscópico, aliadas a conceitos probabilísticos e a grande capacidade computacional atual, essa área debruça-se não só sobre sistemas naturais – como estados da matéria, propriedades de sistemas desordenados, granulares e fluídos, bem como sistemas biológicos –, mas também sobre atividades humanas igualmente ímpares entre si, como bolsas de valores, internet e até mesmo produção literária.

Com pesquisa consolidada no Brasil, esse ramo da física continua a crescer, assim como os desafios que enfrenta.

MARCOS GOMES ELEUTÉRIO DA LUZ  
*Departamento de Física,  
Universidade Federal do Paraná*



Algumas áreas da física são de fácil 'identificação'. Um exemplo de nosso cotidiano: fãs que vibram quando um atleta é capaz de impor uma trajetória inesperada a uma bola e – apesar da surpresa – conseguem intuir que a façanha tem uma razão de ser. O curso imposto à bola representa um processo comum: leis básicas da mecânica – primeiramente estabelecidas pelo físico inglês Isaac Newton (1642-1727) –, usadas intuitivamente pelo jogador. Na mesma linha, cada vez que um equipamento eletrônico é conectado a uma tomada, costuma-se ter a correta noção de que a eletricidade gera a energia necessária para o funcionamento do aparato.

Com base nesses exemplos, é fácil lembrar, dos anos de escola, que muitos fenômenos ao nosso redor são objeto de estudo de alguma das áreas específicas da física – no caso, mecânica clássica e eletromagnetismo.

No entanto, imagine que, no forte verão brasileiro, propuséssemos uma questão para alguém sem formação científica, baseada em uma demonstração, ou seja, em um experimento relativamente simples. Primeiramente, aproximamos um pedaço do elemento químico gadolínio de um prego. Nada acontece. Mas, depois de deixar o gadolínio na geladeira por um tempo e reaproximá-lo do prego, observamos o surgimento de uma força de atração entre eles.

Será que essa pessoa teria facilidade de dizer a qual domínio da física esse efeito está relacionado? Provavelmente, não. A resposta é justamente física estatística.

De fato, essa área tenta entender o comportamento coletivo – ou seja, macroscópico – da matéria, em termos de seus inúmeros elementos básicos: os átomos e as moléculas que a formam. A física estatística – que tem como base a teoria da probabilidade – e a termodinâmica são pilares da ciência moderna. De certa forma, a primeira foi criada para dar fundamentação microscópica à segunda, mas rapidamente adquiriu *status* próprio, sendo hoje um campo independente e muito frutífero.

A física estatística trata do número gigantesco de constituintes de um sistema por meio das leis determinísticas que os governam; porém, sem pretender discutir seus componentes individualmente.

Em condições ambientes de temperatura e pressão, por exemplo, um gás em um recipiente de poucos litros tem em torno de  $10^{23}$  moléculas. Portanto, é inviável na prática determinar a velocidade e a posição, a todo instante, de cada molécula. Porém, tal informação não é importante, uma vez que queremos descrever aspectos como densidade, pressão, temperatura etc., e não em que parte do recipiente uma molécula estará ao meio-dia! As propriedades que interessam resultam do comportamento conjunto das moléculas do gás.

Nessa linha de raciocínio, a física estatística almeja explicar estados coletivos da matéria, usando as regras da física que tratam do mundo atômico e subatômico, aliadas a conceitos probabilísticos e cálculos baseados em médias.

Assim, sua metodologia mista usual é emblemática. Deve-se conciliar uma abordagem determinística (mecânica, eletromagnética etc.) para os elementos formadores do sistema em pequena escala – digamos, a do micrômetro (milionésimo de metro) – com uma análise estatística de todos esses elementos, levando a uma descrição unificada em escalas maiores (por exemplo, a do metro).

Portanto, para a física estatística, é essencial uma combinação de leis fundamentais, princípios gerais de como tratar estados coletivos, conceitos estatísticos e especificação apropriada de escalas de descrição.

## A FÍSICA ESTATÍSTICA NO BRASIL

As primeiras linhas de pesquisa a se desenvolverem no país estavam ligadas à física da matéria condensada, nuclear e de partículas. Assim, inicialmente, a física estatística era mais um suporte do que propriamente um campo de investigação independente. Entretanto, o interesse em propriedades magnéticas e mudanças de estado (transições de fase) da matéria motivaram alguns físicos precursores a se familiarizarem com a física estatística.

Desse modo, trabalhos iniciais em física estatística no Brasil surgiram na década de 1960, mais por conta de contribuições individuais do que como resultado de um campo de pesquisa estabelecido e independente. Por exemplo, na década de 1970, foi o interesse em semicondutores – de forma bem simplificada, materiais com condutividade elétrica entre a dos condutores e a dos isolantes – que impulsionou a criação do grupo de processos fora do equilíbrio na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), no estado de São Paulo.

A primeira geração claramente associada à física estatística foi se estabelecendo no final da década de 1960 e início da de 1970. O processo foi bastante diverso: alguns desses pesquisadores tinham a maior parte de sua formação feita no Brasil; outros já haviam feito estágios de doutorado ou pós-doutorado no exterior; e havia uma parte com doutorado obtido integralmente no exterior – entre estes últimos, estavam aqueles que migraram para o Brasil.

Dessa forma, na primeira metade da década de 1970, consolidava-se uma pequena comunidade pioneira no país, responsável por fomentar reuniões pedagógico-científicas, visitas mútuas etc., que acabaram atraindo muita gente para a física estatística. Como resultado dessas primeiras ações, por exemplo, foi proposto o Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada (ENFMC), cuja primeira edição ocorreu em Cambuquira (MG), em 1978.

Estimulada pelo grupo inicial, surge uma segunda geração – formada entre o final da década de 1970 e meados da seguinte –, a qual, desde o doutorado, já estava direcionada para a física estatística. A partir daí, a área cresceu rapidamente, impulsionada pelo estabelecimento, no país, de uma razoável base computacional, pelo aumento tanto de programas quanto do número de estudantes de pós-graduação, bem como pelo crescente intercâmbio internacional.

Vale destacar, por exemplo, o fato de que o Statphys, maior encontro internacional da área, demorou em aportar no hemisfério Sul, fazendo-o apenas em sua 17ª edição. Porém, o fez justamente na cidade do Rio de Janeiro, em 1989.

Se aceitarmos que uma nova geração completa de pesquisadores se forma a cada década – e que em mecânica estatística a terceira se deu na segunda metade dos anos de 1980 –, então, estamos atualmente completando a quinta geração de pesquisadores dedicados à física estatística, mostrando, portanto, grande maturidade de tal comunidade científica.

Podemos ter uma ideia quantitativa – ainda que bastante aproximada – do crescimento da física estatística brasileira, considerando a evolução do número de

artigos publicados ao longo do tempo. Para tal, podemos tomar como base revistas científicas de prestígio internacional, varrendo este quase meio século de consolidação desse campo de pesquisa no país. Para isso, selecionamos artigos nos quais ao menos um coautor tem endereço institucional brasileiro, agrupando essas contribuições em períodos de cinco anos.

Elencamos, então, quatro importantes revistas dedicadas à área e fundadas em diferentes anos. O resultado é resumidamente o seguinte: i) *Journal of Statistical Physics* (1969): de menos de cinco artigos entre 1976 e 1980 a quase 100 nos úl-

timos cinco anos; ii) *Physica A* (1975): por volta de 10 artigos entre 1976 a 1980 a cerca de 350 no período 2011-2016; iii) *Physical Review E* (1993): de quase 100 (1991-1995) para quase 600 (2011-2016); e iv) *Journal of Statistical Mechanics* (2004): de aproximadamente 10, entre 2001 e 2005, para algo como 130 nos últimos cinco anos.

Esses números nos mostram, por exemplo, que, a partir da década de 1990, a física estatística no Brasil atinge evidente consolidação em termos de volume.

## Física computacional

A física visa quantificar os fenômenos, identificando quantidades apropriadas e atribuindo valores numéricos a elas para poder inferir variações (espacial, temporal etc.) das propriedades físicas relevantes.

Se colocarmos, por exemplo, uma fonte de calor na extremidade de uma barra metálica, o calor irá se propagar. Assim, uma questão pertinente é: qual a temperatura ao longo da barra em cada instante?

As leis da física nos dão fórmulas matemáticas que possibilitam determinar esses valores – hoje, com precisão impressionante. Por isso, é fundamental poder resolver as equações ou simular as regras básicas de evolução de qualquer sistema em estudo e, assim, ser capaz de concretamente responder às indagações científicas postas.

Frequentemente, as dificuldades são tão grandes que métodos analíticos – ou seja, a busca por equações fechadas que descrevam o comportamento do sistema estudado – tornam-se inviáveis, demandando procedimentos computacionais, para que estes calculem numericamente o valor da grandeza que buscamos.

Dada sua diversidade, não é simples resumir o que é a física computacional. Então, em vez de uma definição precisa e única, vamos mencionar aqui, a título de ilustração, três técnicas empregadas por essa área.

A primeira delas é uma ferramenta importante para cálculos numéricos: a transformada rápida de Fourier – referência ao físico e matemático francês Jean-Baptiste Fourier (1768-1830). Transformadas são úteis para converter informação codificada de certa maneira (por

exemplo, pulsos de ondas obtidos ao longo do tempo) em informação organizada de outro modo (em termos de frequências).

A segunda das técnicas da física computacional é o chamado método de Monte Carlo. Baseado em ideias probabilísticas, é uma ferramenta inestimável para simular os estados de sistemas muito grandes – por exemplo, descrever o enorme número de colisões entre as muitas partículas geradas em grandes aceleradores, como o do Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Suíça).

A terceira técnica é a programação paralela, que busca dividir um cálculo sequencial longo em vários mais curtos, executando-os simultaneamente. Vários problemas, como dinâmica de galáxias e padrões de deformação de materiais, demandam o uso dessa técnica para serem resolvidos em tempos factíveis.

No Brasil, o uso de métodos computacionais inicia-se na área de física da matéria condensada ainda em meados da década de 1960, em particular na Universidade de São Paulo (USP), na capital paulista, com cálculos sobre as energias dos elétrons ‘distribuídos’ em sólidos cristalinos. Essa linha de pesquisa acabou por formar muitos pesquisadores no país.

Em termos de infraestrutura acadêmica, os primeiros computadores foram instalados na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), em 1960, e na USP, no ano seguinte. O Instituto de Física da USP comprou um IBM-360/44 em 1965, para ser

usado em diferentes linhas de pesquisa, incluindo o cálculo de propriedades da estrutura atômica e molecular em sólidos. A partir do início da década de 1970, outras universidades passam a adquirir suas próprias máquinas.

Em 1980, é criado o Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC), no Rio de Janeiro. Naquela década, surgem os primeiros computadores pessoais e, na seguinte, são criados os Centros Nacionais de Processamento de Alto Desempenho (Cenapads), propiciando instalações de uso aberto a toda a comunidade.

Os primeiros cinco Cenapads foram o da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em 1992; o da Unicamp e da Universidade Federal do Ceará, ambos em 1994; e, no ano seguinte, da Universidade Federal do Rio de Janeiro e do LNCC.

A ideia de uma grade computacional interligando os Cenapads surge em 2004, promovendo, assim, a fundação do Sistema Nacional de Processamento de Alto Desempenho (Sinapad).

Na história da física computacional brasileira, vale destacar o evento *Workshop on computational physics and cellular automata*, realizado em Ouro Preto (MG), em 1989. A partir de 1997, começa a série de conferências *Brazilian meeting on simulation physics*, atualmente em sua 9ª edição.

Os presentes desafios em física computacional são tão amplos como os da própria física. Certamente, eles serão os grandes propulsores da área no Brasil e no mundo.

*Simulação computacional (com cores artificiais) de instabilidades que surgem ao se misturarem dois fluidos*

## DESAFIOS DE HOJE E AMANHÃ

Atualmente, a área apresenta grande diversidade, o que pôde ser constatado no 1º Encontro Nacional de Física Estatística, realizado em novembro de 2015, em Vitória (ES), que teve mais de 300 inscritos e enorme pluralidade de trabalhos. É importante salientar que, seguramente, não há tópico considerado nas reuniões da série *Statphys* que não seja presentemente também abordado e pesquisado no país.

Apenas dando um breve panorama, a conexão com a matéria condensada continua intensa, resultando em significativas contribuições para o entendimento de diversas propriedades dos sólidos cristalinos (estrutura atômica com padrão repetitivo) e amorfos (estrutura atômica sem padrão definido).

Também têm sido feitos diferentes estudos mecânico-estatísticos sobre a chamada matéria mole. Por exemplo, coloides; polímeros; espumas; géis; material granular (como areia) e vítreo; cristais líquidos e fluidos complexos (inclusive, água); bem como material biológico (tecidos) – (ver nesta publicação ‘Matéria mole e fluidos complexos’). Além disso, vale ressaltar que a análise de transições de fase é uma escola de investigação muito forte e produtiva no país.

O Brasil também desempenha importante papel em muitas outras subáreas da física estatística, algumas com forte apelo interáreas. Uma dessas subáreas está relacionada a sistemas muito sensíveis a pequenas variações em suas condições presentes, ou seja, sistemas que, mesmo fracamente perturbados, podem seguir um comportamento bastante distinto do que apresentavam até então (conhecido como caos determinístico) – o clima terrestre sendo um exemplo típico. São os chamados sistemas dinâmicos não lineares, base para fenômenos associados a fractais, caos e complexidade. Outra subárea nessa linha trata de assunto certamente desafiador: sistemas fora do equilíbrio – o vidro, em certas condições, é aqui um exemplo simples de nosso cotidiano.

A partir da década de 1990, ganham muito impulso diversas linhas, como a aplicação de física estatística à biologia; os estudos em métodos numéricos, com os quais se tenta achar uma solução muito próxima da exata para um problema com a ajuda de alta capacidade computacional; os processos ditos markovianos, ou seja, aqueles em que o ‘passado’ (estados anteriores) é, de certa forma, irrelevante para a predição do ‘futuro’ (estados seguintes), como é o caso do fenômeno da catálise (por exemplo, ‘aceleração’ de uma reação química).

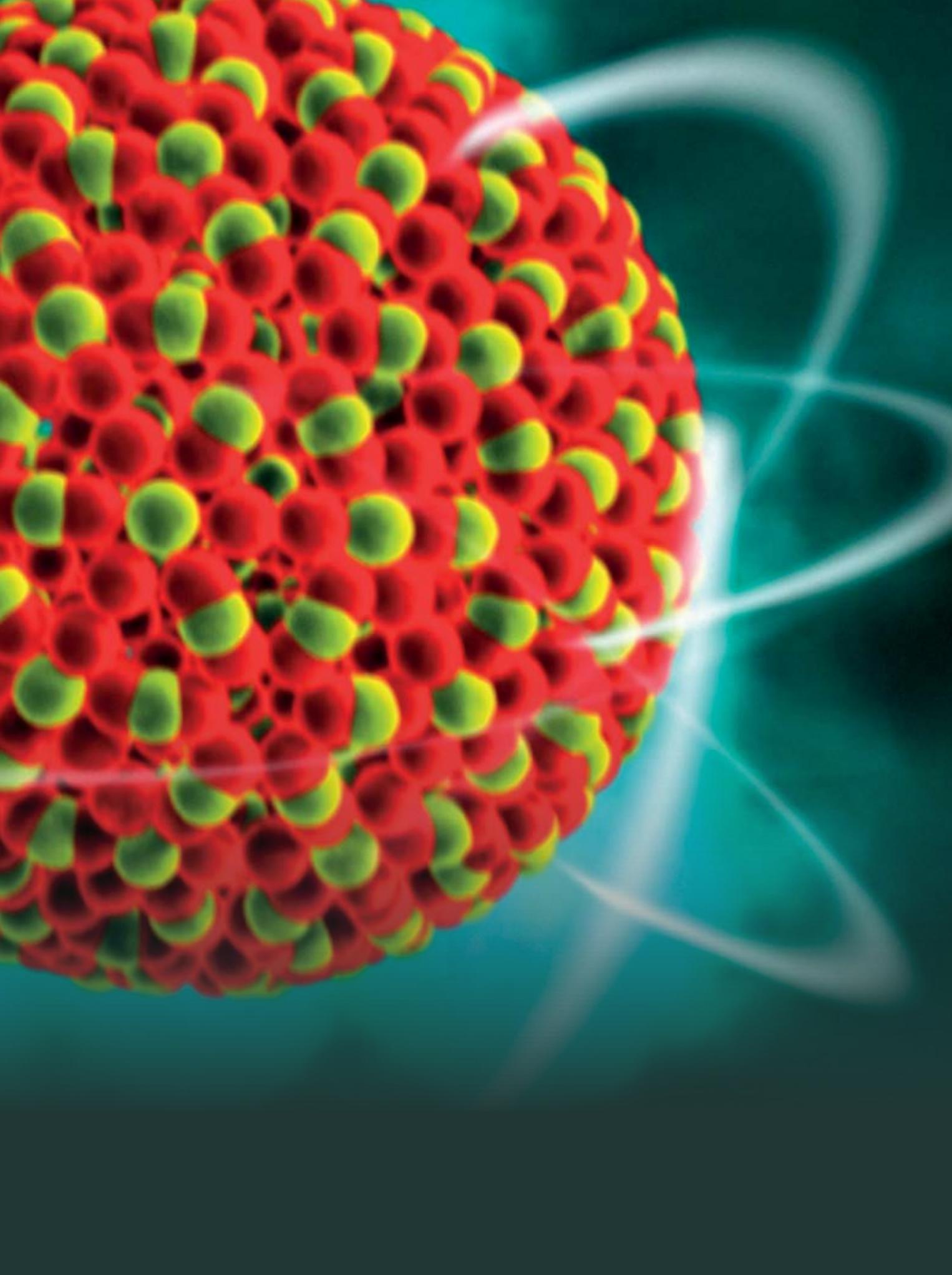
Também é digno de nota que há, no Brasil, grande interesse em estudos abordando os alicerces teóricos da física estatística. Por exemplo, estudos focando a equação de Boltzmann – referência ao físico teórico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906); estatísticas generalizadas; sistemas com interação

de longo alcance (por exemplo, interações gravitacionais ou certos sistemas microscópicos especiais); comportamentos quânticos, como fenômenos associados com a condensação de Bose-Einstein (aglomerado de partículas que, a baixíssimas temperaturas, comporta-se como, de forma pictórica, um ‘átomo gigante’), transições de fase quânticas etc.

Concluindo, a física estatística permeia a compreensão do mundo à nossa volta de forma muito abrangente. De aplicações em sistemas naturais tão ímpares, como fenômenos ecológicos, cristais líquidos, transporte em plasmas (‘quarto estado’ da matéria), passando por atividades humanas, como bolsa de valores, os mais diversos tipos de redes (por exemplo, a internet) e até mesmo produção literária, na qual se investiga, por exemplo, a distribuição estatística de certas palavras ou letras.

Em todos esses casos – mesmo nos ‘não naturais’ –, os constituintes elementares geram um comportamento emergente global macroscópico. Assim, a física estatística tem os conceitos e as ferramentas adequados para entender todos esses sistemas.

Há um aspecto bastante importante nessa já notória flexibilidade dos métodos em mecânica estatística. É um campo que está permanentemente evoluindo, procurando estender seu alcance. Para isso, necessita sempre checar sua fundamentação básica e conceitual, para atingir novos níveis de generalidade e poder de previsão. Dessa forma, a todo momento, problemas são levantados em seu escopo, fazendo da física estatística uma das áreas mais dinâmicas e desafiadoras da física.



# Física nuclear e aplicações

*Desafios e perspectivas do conhecimento sobre o núcleo atômico*

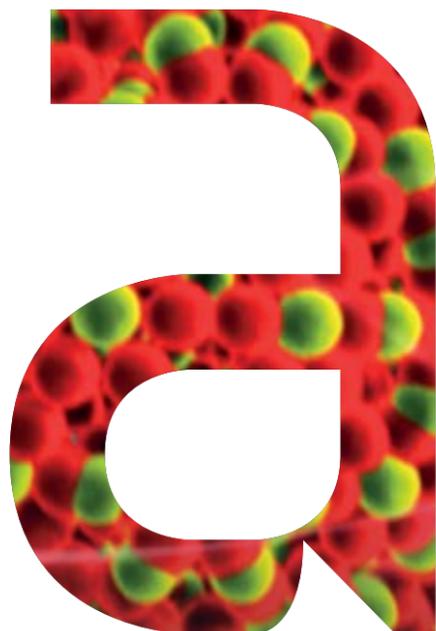
Ao perscrutar os segredos do núcleo atômico – o ‘coração’ da matéria –, a física nuclear gera não só conhecimento básico, na fronteira da ciência, mas também tecnologia de ponta – ou seja, riqueza e bem-estar para a sociedade. Sua abrangência interdisciplinar e ampla gama de aplicações – na medicina, nas artes, na arqueologia, no meio ambiente, no espaço, nos materiais etc. – fazem dela um campo de pesquisa vivo e ativo.

Além disso, a física nuclear tem importância estratégica para as nações. Prova disso, são os altos investimentos que países como Alemanha, Japão, EUA e China vêm fazendo na construção de aceleradores e laboratórios.

ALINKA LÉPINE-SZILY

MAHIR S. HUSSEIN

*Instituto de Física e Instituto de Estudos Avançados,  
Universidade de São Paulo*



A física nuclear tem como objetivo a investigação da origem, evolução, estrutura e das chamadas fases da matéria nuclear de interação forte, ou seja, daquela que ‘sente’ a chamada força forte, responsável por manter o núcleo atômico coeso.

Questões fundamentais em aberto levaram a física nuclear a ampliar seus horizontes, e, hoje, seu alcance se estende desde as partículas mais fundamentais, como os quarks (constituintes dos prótons e nêutrons, por exemplo), até gigantescas estruturas do universo, como as supernovas (estrelas massivas que explodem no final da vida).

Os fenômenos nucleares estão relacionados a um enorme intervalo de energia e às mais diversas escalas de comprimento.

O papel original e central da física nuclear é buscar a compreensão das propriedades dos núcleos atômicos e da matéria nuclear (prótons, nêutrons, mésons, quarks, glúons etc.). Essa é uma tarefa das mais árduas, que necessita do desenvolvimento de técnicas diversas para o tratamento desse sistema de muitos corpos, no qual age não só a força (interação) forte, mas também a fraca (responsável por certos tipos de radioatividade) e a eletromagnética (envolvida na atração ou repulsão de cargas elétricas e dos polos de um ímã).

O objetivo primordial da física nuclear é desenvolver uma teoria completa e preditiva dos núcleos complexos. Concomitantemente com o avanço teórico, houve um grande êxito experimental que permitiu a produção de núcleos superpesados (radioativos e com centenas de constituintes), bem como de feixes de núcleos ricos em nêutrons e/ou prótons, além de suas reações – estas agindo como feixes secundários.

Experimentos possibilitaram também estudar a quebra de simetrias fundamentais – propriedades relativas à inversão de carga elétrica, tempo e ‘espaço’ –, bem como reações em energias extremamente altas (ditas, ultrarrelativísticas). O propósito desses estudos foi entender a matéria – na forma de uma ‘sopa’ quentíssima – formada logo após o Big Bang, há cerca de 13,8 bilhões de anos, quando surgiram os núcleons (prótons e nêutrons), os quarks e os glúons (partículas que ‘carregam’ a força forte nuclear).

Entende-se também que a abundância dos núcleos de hidrogênio, hélio e lítio foi produzida cerca de três minutos depois do Big Bang, na chamada nucleossíntese primordial, quando ocorreu o esfriamento do universo. Todos os outros elementos químicos existentes foram produzidos por meio de reações nucleares que aconteceram em estrelas comuns, como o Sol, bem como em eventos explosivos (novas e supernovas) ou no que restou desses fenômenos extremos (anãs brancas e estrelas de nêutrons, por exemplo).

Algumas das reações podem ser estudadas em laboratório – essa linha de pesquisa, por sinal, é uma das áreas mais ativas na atualidade (inclusive, no Brasil). De fato, desde 2004, está em funcionamento, na Universidade de São Paulo (USP), o sistema Ribras (sigla, em inglês, para Feixes de Íons Radioativos no Brasil), a primeira instalação experimental no hemisfério Sul que permite produzir feixes radioativos leves e de baixa energia.

Núcleos instáveis de curta vida média (tempo médio que um núcleo radioativo leva para se desintegrar) podem ter enorme importância em reações relevantes à astrofísica, pois foram produzidos e absorvidos em diferentes processos da evolução estelar ou mesmo na nucleossíntese.

A descoberta de que os núcleons são, na realidade, sistemas compostos de quarks e glúons fez muitos físicos nucleares se dirigirem para a investigação de propriedades dos quarks – uma delas é o fato de essas partículas não existirem livremente. Com isso, hoje, os domínios da pesquisa da física nuclear e da física das partículas elementares se tornaram interligados, dando origem à chamada física de hádrons (classe de partículas que interagem sob a ação da força forte).

A física de hádrons (ou hadrônica) estuda, por exemplo, como os núcleons adquirem suas propriedades quando estão ligados dentro do núcleo; se há evidências claras da estrutura nucleônica a partir de fenômenos nucleares; e se a estrutura interna do próton e do nêutron (com três quarks cada um deles) altera, de alguma forma, nossa compreensão da estrutura nuclear.

Mesmo que a natureza não permita a existência de quarks livres no espaço, há a possibilidade de retirar essas partículas de seu confinamento nuclear, ao se criarem, em laboratório, condições similares às que existiram logo após o Big Bang, quando as temperaturas eram extremamente altas, da ordem de bilhões de graus.

Essa transição de hádrons nucleares para uma ‘sopa’ quentíssima (ou plasma) de seus componentes primários, quarks e glúons, pode ocorrer em colisões entre íons pesados a altíssimas energias. A formação desse plasma é o objetivo principal de experimentos envolvendo íons pesados relativísticos.

Para esse propósito, foram construídos o RHIC (sigla, em inglês, para Colisor de Íons Pesados Relativísticos), em operação desde 2000, bem como o experimento Alice, um dos detectores do LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons), no Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN), na Suíça. O Alice começou a funcionar em 2008 e tem como foco principal o estudo do plasma de quarks e glúons.

## O BRASIL NA ÁREA

No Brasil, há em torno de 180 doutores trabalhando na área de física nuclear. Esse número é igualmente dividido entre físicos experimentais e teóricos. Suas atuações em pesquisa abrangem todas as subáreas do campo: física nuclear de baixa energia (física nuclear tradicional); física hadrônica; física de reações de íons pesados em altíssimas energias; o plasma de quarks e glúons; e física nuclear aplicada.

A pesquisa nessa área no Brasil é bem reconhecida internacionalmente, com um número razoável de físicos nucleares que recebem convites regularmente para apresentar palestras em congressos internacionais; que compõem comitês internacionais de organização de conferências; e que atuam como consultores científicos das revistas mais importantes da área. Além disso, um grande número de físicos nucleares brasileiros tem bolsa de produtividade de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e muitos são coordenadores ou pesquisadores principais em projetos federais e estaduais.

O futuro da área no Brasil depende da captação de recursos de pesquisa, formação de mestres e doutores e participação no desdobramento das potenciais aplicações para o benefício da sociedade. Em todas essas atividades, a comunidade nacional de física nuclear está bem atuante.

A tradição brasileira em pesquisa em física nuclear se confirma por meio das várias contribuições importantes feitas ao longo de seis décadas. Na década de 1950, no cenário internacional, foi descoberto o mecanismo que explica os limites de compressão da matéria nuclear – quando núcleons começam a se tocar – e a validação do chamado modelo de camadas (ou seja, no qual o núcleo é visto como uma estrutura em camadas).

Outro resultado importante no âmbito internacional foram as medidas e análises de reações nas quais dêuterons (núcleos formados por um próton e um nêutron) colidiam contra prótons e nêutrons isolados. Até hoje, esses resultados – obtidos com precisão – são relevantes tanto para a astrofísica nuclear quanto para a física de núcleos chamados exóticos, cuja organização dos núcleons lembra um sistema planetário ou anéis interligados.

Pelo menos dois resultados experimentais obtidos no país ganharam reconhecimento internacional. Tecnicamente, eles são denominados potenciais ópticos e permitem estudar propriedades da colisão entre ‘projéteis’ compostos – formados por mais de um núcleon, como dêuteron, hélio-4, lítio-6, lítio-7 e hélio-6 – contra ‘alvos’ leves (carbono-12 e oxigênio-16) e pesados.

O primeiro desses resultados chegou a ser conhecido como ‘Watanabe potential’ – referência ao físico Shiguo Watanabe, do Instituto de Física da USP. O segundo, desenvolvido ainda na década de 1990, passou a ser chamado ‘São Paulo potential’ pela comunidade internacional.

No país, uma das áreas de pesquisa mais destacadas em física nuclear é a das reações induzidas por íons pesados, tanto na área teórica quanto experimental, com dados obtidos no acelerador Pelletron e no sistema Ribras, ambos na USP. Por sua vez, reações de baixas energias são investigadas em São Paulo, no Rio de Janeiro, em Niterói (RJ) e em São José dos Campos (SP). Em particular, virou referência mundial a pesquisa feita por físicos nucleares brasileiros em reações de fusão nuclear tanto com núcleos normais (e estáveis) quanto exóticos.

Na área aplicada, é possível citar a pesquisa feita no laboratório de AMS (sigla, em inglês, para espectroscopia de massa por acelerador), instalado no Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense e onde são feitos estudos de estrutura da matéria, datação etc. No acelerador do Laboratório de Análises de Materiais por Feixes Iônicos, da USP, são feitas análises de materiais e de superfícies com métodos dedicados a essa linha de pesquisa (Pixe, RBS, Erda etc.). Na mesma universidade, no laboratório do acelerador Pelletron, circuitos eletrônicos que serão usados em satélites são bombardeados por feixes de íons pesados, para testar a resistência desses dispositivos aos raios cósmicos (núcleos atômicos energéticos que bombardeiam a Terra a todo instante).

Para finalizar essa descrição concisa do cenário nacional, citamos, ainda que brevemente, outras áreas da física nuclear nas quais o Brasil tem atuado e se destacado internacionalmente: i) criação e estudo de núcleos altamente excitados; ii) entendimento da estrutura dos núcleons; iii) reações de íons pesados em energias ultrarrelativísticas; iv) modelos hidrodinâmicos para o entendimento do núcleo – por sinal, um desses modelos criado no Brasil é bem reconhecido internacionalmente; v) estrelas de nêutrons e da matéria nuclear sob condições extremas de densidade e temperatura; vi) radiação e dosimetria e sua aplicação em medicina; vii) datação, arqueologia e pesquisa da composição e das características de obras de arte.

Por fim, vale mencionar que a distribuição dos físicos nucleares brasileiros nas várias regiões do país é tal que facilita a colaboração entre os vários grupos. A maioria se concentra no eixo Rio-São Paulo – refletindo o modo como se deu o desenvolvimento histórico da física no país –, mas há também um número razoável de pesquisadores dessa área em Santa Catarina, no Rio Grande do Sul, na Paraíba e em Minas Gerais.

## IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS

Para que o país domine plenamente a tecnologia nuclear, é fundamental a formação de recursos humanos em física nuclear. A educação desempenha papel relevante nas atividades da física nuclear, área com características distintas de outros ramos da física, por seu forte componente experimental, aplicado e tecnológico, bem como pela necessidade de sólida formação em física básica.

Estudantes que trabalham em laboratórios de física nuclear se envolvem com o projeto, a construção e a manutenção de equipamentos experimentais sofisticados, além de utilizá-los para a pesquisa, tendo contato com a produção de dados experimentais e interpretação dos resultados. Desse modo, aprendem técnicas modernas e fazem contribuições significativas para os programas de pesquisa.

A excelente formação adquirida com essas atividades garante a geração dos futuros líderes tanto nas ciências nucleares quanto em outras atividades de importância para o desenvolvimento tecnológico. Por exemplo, um estudante ou físico experimental que trabalhe com aceleradores adquire *know-how* em novos materiais (para a construção de detectores); informática (para aquisição e tratamento de dados); eletrônica rápida; ultra alto vácuo etc.

As aplicações resultantes de desenvolvimentos tecnológicos da física nuclear são muito numerosas e importantes. Elas são empregadas, por exemplo, nas artes, na arqueologia, em energia, no meio ambiente, nas ciências dos materiais, nas ciências espaciais e na medicina (ver nesta publicação ‘Física médica’). Esses conhecimentos serão de grande valia no desenvolvimento de nosso parque tecnológico de ponta, na obtenção de avanços significativos em áreas como eletrônica e novos materiais, bem como equipamentos supercondutores – vale lembrar que a informática no Brasil teve início em um laboratório de física nuclear básica.

A abrangência interdisciplinar e ampla gama de aplicações em campos tão diferentes fazem da física nuclear área de importância estratégica para o país. Isso vem sendo reconhecido em países como Alemanha, EUA, Japão e China, onde, hoje, há investimentos de bilhões de dólares para a construção de grandes aceleradores e laboratórios de física nuclear.

Esses novos laboratórios, vários acelerando feixes radioativos, provam que a física nuclear é uma área muito viva e ativa das ciências físicas.



# Física de partículas e campos

*O universo entendido por meio de seus constituintes mais fundamentais*

Uma das perguntas mais penetrantes feitas pela ciência – e, na Antiguidade, pelos filósofos – tem uma formulação de aparente simplicidade: afinal, de que são feitas as coisas?

As respostas acumuladas ao longo dos séculos – e, principalmente, nos últimos 100 anos, quando a primeira partícula elementar foi detectada – têm dado à humanidade um vasto, preciso e profundo arcabouço teórico e experimental para explicar não só a matéria em si, mas também algo muito mais grandioso: o funcionamento do universo.

Da dimensão subatômica à maior estrutura conhecida do universo. Eis a extensa lista de temas aos quais se dedicam os físicos de partículas elementares e campos.

ROGÉRIO ROSENFELD

*Instituto de Física Teórica e  
Instituto Sul-Americano para a Pesquisa Fundamental (ICTP-SAIFR),  
Universidade Estadual Paulista*



Atualmente, temos um excelente modelo que descreve três das quatro interações ('forças') fundamentais da natureza: as interações eletromagnéticas, as fracas e as fortes. A força eletromagnética está presente em nosso cotidiano e nos é familiar como, por exemplo, na força entre dois ímãs. As duas últimas atuam apenas no âmbito do núcleo atômico, ou seja, em dimensões da ordem da milésima parte do trilionésimo de metro ( $10^{-15}$  m) e são menos familiares. A quarta interação – não descrita pelo modelo – é a gravidade.

Apesar de seu grande sucesso experimental – sendo capaz de descrever todos os fenômenos medidos em aceleradores de partículas e que culminou com a descoberta do bóson de Higgs em 2012 –, o chamado Modelo Padrão de Partículas Elementares e Interações Fundamentais (ou apenas Modelo Padrão) é incompleto. A seguir, descreveremos alguns dos motivos da razão de pensarmos assim.

Sabemos, por meio de diversas observações astronômicas feitas a partir da década de 1930, que aproximadamente um quarto de nosso universo é formado pelo que denominamos matéria escura – possivelmente, feita de um novo tipo de partícula elementar, estável, sem carga elétrica e que, portanto, não interage com a luz. Ou seja, a matéria escura é invisível – daí seu nome. Apenas seus efeitos gravitacionais em galáxias são observados.

O problema é que o Modelo Padrão não tem uma partícula com essas características. Portanto, sua existência apontaria para uma nova (e desconhecida) física.

O LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons) – o maior e mais potente acelerador de partículas da atualidade, localizado em um laboratório internacional denominado CERN, na fronteira entre a Suíça e a França – tem condições técnicas de produzir diretamente essa nova partícula. E, de fato, essa busca tem sido conduzida pelos experimentos realizados ali, resultando, até o momento, apenas em limites sobre suas propriedades (massa, por exemplo).

Há também outros experimentos construídos para detectar diretamente a matéria escura presente em nossa galáxia e que, por isso, transpassa constantemente nosso planeta (e nossos corpos). Essas iniciativas estão em laboratórios subterrâneos, para evitar a contaminação dos chamados raios cósmicos, partículas provenientes do espaço que, a todo momento, bombardeiam a Terra.

O prêmio Nobel do ano passado foi dado a líderes de experimentos que mostraram que os neutrinos – partículas que, segundo o Modelo Padrão, interagem apenas por meio das interações fracas – possuem massa. Esses experimentos conseguiram detectar neutrinos produzidos em reações nucleares no Sol, em reatores nucleares na Terra e em reações de raios cósmicos na atmosfera terrestre. No Modelo Padrão, os neutrinos não têm massa, e, portanto, esse resultado aponta mais uma vez para sua incompletude.

Outro problema que indica a necessidade de uma nova física é a observação de que nosso universo é assimétrico: há muito mais matéria do que antimatéria. O físico russo Andrei Sakharov (1921-1989), já em 1967, mostrou quais as condições necessárias para uma teoria gerar essa assimetria a partir de uma situação inicial simétrica.

Uma dessas condições é a de que a teoria deve violar uma simetria chamada CP (simetria por inversão simultânea da carga elétrica e da orientação no espaço). A violação da simetria CP no Modelo Padrão foi descoberta em 1964, mas mostrou-se insuficiente para gerar a relação hoje observada no universo entre matéria e antimatéria.

Portanto, pode ser que haja outra fonte de violação dessa simetria ainda não detectada. De fato, a parte do Modelo Padrão que trata das partículas da família do elétron (elétron, múon e tau), bem como dos três tipos de neutrinos conhecidos (neutrino do elétron, neutrino do múon e neutrino do tau), ainda não foi bem explorada e pode ser, portanto, a fonte procurada.

Essa fonte de violação de simetria pode estar associada ao mecanismo de geração de massa para os neutrinos, ainda não compreendido.

Existem vários modelos de uma 'nova física' que procuram complementar o Modelo Padrão. Por exemplo, o LHC já está testando os chamados modelos supersimétricos, bem como os modelos compostos – que descrevem o bóson de Higgs como sendo formado de outras partículas mais fundamentais –, além de modelos que postulam a existência de novas dimensões.

Essas três grandes classes de extensões do Modelo Padrão preveem grande número de novas partículas que estão sendo procuradas no LHC. Vários grupos de pesquisadores brasileiros trabalham nos experimentos do LHC, e há planos de o Brasil se tornar um país-membro do CERN.

## ENERGIA DO VÁCUO?

O 'elefante no armário' em nossa busca por uma descrição das forças da natureza é, sem dúvida, a força gravitacional. A teoria da relatividade geral, proposta pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955), em 1915 – quando acrescida da chamada 'constante cosmológica' –, descreve todos os fenômenos gravitacionais observados até o momento no universo. A constante cosmológica pode ser entendida como uma 'antigravidade' que faz com que o universo se expanda de modo acelerado, como foi descoberto no final do século passado.

No entanto, é conhecida a dificuldade de descrever a relatividade geral em escalas microscópicas, pois essa teoria não faz sentido quando se tenta tratá-la em nível quântico, ou seja, atômico e subatômico.

A chamada teoria das supercordas – na qual todas as partículas elementares podem ser descritas como vibrações diferentes de pequenas cordas – apresenta um tratamento consistente de uma teoria quântica da gravitação. Mas ainda não há evidências de que ela descreva nosso mundo. Por exemplo, nessas teorias devem existir seis dimensões adicionais, que devem ser compactas e pequenas para satisfazer dados experimentais.

No entanto, deve-se salientar que a teoria das supercordas deu origem a novas técnicas que permitem cálculos matemáticos (ditos analíticos) que antes não eram possíveis. E esse novo ferramental teórico tem aplicações no estudo tanto dos fenômenos que envolvem a força forte nuclear quanto daqueles relacionados aos sólidos (ou matéria condensada).

Um grande avanço recente foi anunciado em fevereiro deste ano: a detecção de ondas gravitacionais – previstas por Einstein há exatos 100 anos – pelo experimento LIGO (sigla para Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferometria a Laser), do qual participam dois grupos de pesquisadores do Brasil.



Apesar das evidências indiretas da existência das ondas gravitacionais a partir da observação dos chamados pares de pulsares – o que rendeu o prêmio Nobel de 1993 a seus descobridores –, a detecção direta abre as janelas para uma nova astronomia, capaz de observar alguns dos eventos mais violentos do universo, como a fusão de buracos negros.

Cerca de 70% de nosso universo são compostos de algo denominado energia escura, sobre a qual temos pouco conhecimento. A explicação mais simples é a de que ela seja uma energia armazenada no próprio espaço, no vácuo.

Por mais estranho que esse conceito possa parecer, é exatamente esse o efeito da constante cosmológica, introduzida por Einstein, em 1917, para forçar o universo a permanecer estático, como ele era concebido à época com base em observações. Com a descoberta da expansão do universo, em 1929, Einstein dispensou sua constante e se arrependeu por tê-la introduzido.

A situação mudou drasticamente com a descoberta inesperada, em 1998, da expansão acelerada do universo, reconhecida com o prêmio Nobel de 2011. A constante cosmológica reaparecia definitivamente na física, e explicar seu valor observado consiste em um dos maiores problemas atuais.

Entender melhor a natureza da energia escura é um dos objetivos de grandes levantamentos observacionais internacionais atualmente em andamento, como o SDSS IV (sigla para Levantamento Digital Celeste Sloan) e o DES (Levantamento sobre Energia Escura), ambos com a participação de cientistas brasileiros.

## FUTURO PROMISSOR

O futuro da física de partículas e campos é bastante promissor, e o Brasil está bem posicionado para dele participar ativamente. O LHC continuará a operar por pelo menos mais 14 anos, com uma melhoria destinada a aumentar o número de colisões de um fator maior que 10 a partir de 2025. Com isso, esperamos encontrar partículas relacionadas a uma nova física, extensões do Modelo Padrão.

E essas surpresas podem acontecer rapidamente: por exemplo, em dezembro do ano passado, foi anunciada a existência de sinais compatíveis com uma nova partícula, com massa equivalente à de 750 prótons. Caso novos dados confirmem a descoberta – o que pode ocorrer ainda este ano –, será a primeira partícula dessa nova física.

Um novo experimento internacional está sendo construído para o estudo dedicado aos neutrinos: o LBNF (Instalação de Longa Linha de Neutrinos), acoplado ao DUNE (Experimento de Neutrino em Subterrâneo Profundo). Nele, o laboratório Fermilab, perto de Chicago (EUA), produzirá um feixe de neutrinos de alta intensidade que será direcionado ao laboratório Sanford, na Dakota do Sul, em uma viagem de 1,3 mil km.

Algumas motivações desse experimento, que já conta com a participação de grupos experimentais brasileiros, são: possíveis novas fontes de violação de CP, mais informações sobre as propriedades dos neutrinos e, talvez, a descoberta de novos tipos dessas partículas.

A busca de matéria escura pode ser bem-sucedida com o experimento CTA (sigla Rede de Telescópios Cherenkov), que será o instrumento mais avançado do planeta para detectar fótons de raios gama com energias maiores que 10 GeV. Esses fótons podem ser gerados pela aniquilação de partículas de matéria escura em regiões de maior densidade no universo.

Em fase de pré-construção, o CTA – que conta com a participação de grupos brasileiros – irá também estudar raios cósmicos e a astrofísica de objetos que possam gerar esses fótons, como discos de matéria ao redor de buracos negros. No ano passado, foram selecionados os locais para o CTA: a região do Paranal, próximo ao deserto do Atacama (Chile), que receberá cerca de 100 antenas, e a região de La Palma (Espanha), com 20 antenas.

No campo da matéria escura, devem-se também destacar os esforços para a construção de um laboratório subterrâneo multinacional na América do Sul, a ser construído sob a cordilheira andina. O Andes (sigla para Sítio para Experimento Profundo Água Negra) será o primeiro laboratório desse tipo no hemisfério Sul e permitirá testes sobre a variação sazonal dos sinais de matéria escura.

No campo das ondas gravitacionais, o instrumento ítalo-francês Virgo entrará em operação até o final deste ano, juntando-se aos esforços do LIGO e possibilitando a localização de fontes de ondas gravitacionais com maior precisão. Há também a sonda espacial LISA Pathfinder, lançada em dezembro do ano passado, para estudar a viabilidade de construir um imenso detector de ondas gravitacionais no espaço, chamado eLISA (sigla para Antena Espacial Avançada de Interferometria a Laser), projeto da Agência Espacial Europeia (ESA).

E, em relação à energia escura, novos telescópios devem iluminar nossos conhecimentos sobre esse misterioso fenômeno, como LSST (sigla para Telescópio de Grande Levantamento Sinóptico), cuja construção, no Observatório Internacional de Cerro Tololo (Chile), teve início no ano passado. Um acordo recém-assinado permitirá a participação de cientistas brasileiros no LSST. Também deve entrar em funcionamento em breve outro projeto denominado J-PAS (sigla para Levantamento Astrofísico Javalambre da Física do Universo Acelerado), colaboração entre Espanha e Brasil.

Olhando para prazos bem mais longos, já foi iniciada a discussão sobre futuros colisores circulares que virão a substituir o LHC na fronteira das altas energias. Em particular, a China está planejando construir o CEPC (sigla para Colisor Circular de Pósitrons e Elétrons), com circunferência entre 50 km e 100 km – superando, portanto, o LHC, que tem 27 km. O projeto seria iniciado entre 2020 e 2025. Em uma segunda fase, planejada para 2040, essa máquina passaria a operar colidindo prótons contra prótons, no chamado SPPC (SuperColisor Próton-Próton), com energias de até 100 trilhões de elétrons-volt (100 TeV), mais de sete vezes maiores que as do LHC.

Em resumo, a área de física de partículas e campos fez tremendos avanços nos últimos 50 anos. E esperamos que novas e revolucionárias descobertas sobre a composição e o funcionamento do universo estejam nos esperando em um futuro próximo.



# Física de plasmas

## *A ciência e as aplicações tecnológicas do quarto estado da matéria*

O Sol sempre fascinou a humanidade. Mas, somente no século passado, chegou-se a um entendimento robusto dos mecanismos que geram luz e calor nessas fornalhas cósmicas.

Com base nesse e outros conhecimentos, a física de plasmas tem atualmente uma ambição nada modesta – mas, tudo indica, factível: com a ajuda de reatores sofisticados, imitar o Sol na Terra e, desse modo, produzir comercialmente energia limpa e abundante. De sua parte, o Brasil se prepara para esse desafio, por meio de um laboratório nacional.

Tido como um ‘quarto estado’ da matéria, o plasma – gás de partículas carregadas eletricamente – está presente não só nas estrelas, mas também no espaço interestelar, no ambiente terrestre e até mesmo em nosso cotidiano.

A física de plasmas vai bem além da fusão nuclear controlada. Sua pesquisa básica é rica em temas, e seu viés tecnológico tem aplicações importantes na indústria.

RICARDO L. VIANA  
*Departamento de Física,  
Universidade Federal do Paraná*



A produção de energia no interior do Sol, sem a qual a vida na Terra não seria possível; o funcionamento dos tubos de gás neônio usados na decoração e publicidade; e a perspectiva futura de obter energia limpa e abundante a partir da fusão de núcleos atômicos leves. O que esses assuntos têm em comum?

Todos eles estão relacionados à presença de plasmas, com diferentes características físicas; porém, com a mesma natureza essencial. Um plasma é basicamente um gás de partículas eletricamente carregadas: elétrons (carga negativa) e íons (carga positiva), com propriedades peculiares decorrentes da existência de 'forças elétricas' (ou, tecnicamente, interações coulombianas) de longo alcance entre as partículas. Por isso, é comum dizermos que o plasma é um quarto estado da matéria, para distingui-lo dos gases neutros, em que essas propriedades não estão presentes.

As propriedades peculiares de um plasma manifestam-se no que costumamos chamar de comportamento coletivo, ou seja, fenômenos nos quais um grande número de partículas conspira para certa finalidade. Exemplo: se inserirmos um objeto eletricamente carregado no interior do plasma, as partículas deste irão se comportar de modo a tentar blindar o campo elétrico produzido pelo objeto. Assim, a grandes distâncias do objeto, o plasma será quase neutro, eletricamente falando.

Os plasmas podem ser descritos basicamente por duas grandezas físicas: sua temperatura – relacionada à velocidade (energia cinética) das partículas – e densidade – número de partículas por metro cúbico ( $m^3$ ). Dependendo dos valores dessas duas grandezas, os plasmas existem em diferentes contextos no universo: a temperatura abrange sete ordens de grandeza, enquanto a densidade varia em nada menos do que 28 ordens de grandeza!

Para darmos alguns exemplos, o meio interestelar é preenchido por um plasma de hidrogênio extremamente tênue, com temperaturas e densidades muito baixas. No entanto, no interior do Sol, o plasma tem temperatura e densidade tão altas que permitem a ocorrência de reações de fusão de núcleos leves de hidrogênio, produzindo a energia que é irradiada para o espaço e que reconhecemos basicamente sob a forma de luz e calor.

E é justamente a possibilidade de obter energia por meio da fusão termonuclear que tem levado cientistas do mundo todo (inclusive do Brasil) a investigar meios de confinamento magnético de plasmas, como em máquinas cuja forma lembram 'rosquinhas' (*donuts*) gigantes' (toroides) chamadas tokamaks. De fato, a fusão termonuclear solar é possível graças ao fato de o plasma no interior da estrela estar confinado pelo intenso campo gravitacional lá existente.

Costuma-se dizer que cerca de 99% da matéria ordinária (dita bariônica) do universo estão sob a forma de plasma. Será que vivemos justamente no 1% que não é constituído majoritariamente por plasmas?

De certa forma, a resposta para essa pergunta é 'sim'. Mas há importantes exemplos de plasmas em nosso planeta, como a ionosfera, alta camada atmosférica responsável pela reflexão de ondas eletromagnéticas e a transmissão de sinais de rádio e televisão a longas distâncias – sem esse 'escudo' refletor, seria impossível transmitir, de uma região distante para outra, as ondas eletromagnéticas, devido à curvatura da Terra.

Além disso, há vários tipos de plasmas tecnológicos criados no laboratório, os quais têm uma gama de aplicações: de lâmpadas fluorescentes e tubos de descargas elétricas em gases (como neônio) a televisores, maçaricos (tochas) e outros aparelhos extremamente úteis em nosso cotidiano. Além disso, na indústria, é bastante comum a criação de plasmas para facilitar tratamentos de superfícies.

E foi justamente no contexto tecnológico que os plasmas foram inicialmente estudados. Ainda que as pesquisas em descargas elétricas em gases venham de meados do século 19, a moderna física de plasmas é relativamente recente: os primeiros trabalhos são do físico norte-americano Irving Langmuir (1881-1957) e colaboradores, na década de 1920. Suas descobertas foram motivadas pela necessidade de construir tubos de vácuo que pudessem conduzir altas correntes elétricas, o que é possível preenchendo-os com gases ionizados.

Na década de 1930, o plasma ionosférico foi intensamente estudado por causa de seu papel já citado na propagação de ondas de rádio. Depois da Segunda Guerra Mundial, foi proposto o uso da energia obtida pela fusão termonuclear para a fabricação de artefatos bélicos, como a bomba de hidrogênio.

No início da década de 1950, pesquisadores nos EUA e na então União Soviética propuseram que as reações de fusão obtidas nos artefatos bélicos poderiam ser controladas pelo confinamento magnético do plasma. Caso tal objetivo fosse alcançado, seria possível obter energia praticamente ilimitada a partir de insumos abundantes na natureza. Nos primeiros anos daqueles estudos, as perspectivas pareciam tão promissoras que as pesquisas eram secretas.

Os plasmas, entretanto, mostraram-se bem menos 'obedientes' do que se imaginava a princípio, e as pesquisas sobre o confinamento magnético de plasmas estendem-se até a atualidade, envolvendo a participação de vários grandes grupos de pesquisa, muitos dos quais se associam a projetos internacionais, como o ITER (sigla, em inglês, para Reator Experimental Termonuclear Internacional), atualmente sendo construído na França.

O ITER é o primeiro passo para um futuro reator comercial de fusão, o que se projeta para os próximos 50 anos, quando o provável esgotamento dos combustíveis fósseis irá nos obrigar a procurar fontes alternativas, baratas e limpas de energia para a continuidade da civilização.

## NO BRASIL

A física de plasmas no Brasil teve origem por volta da década de 1970, em diversos grupos de pesquisa que trabalhavam em quatro subáreas: fusão controlada; plasmas tecnológicos; fenômenos básicos; plasmas espaciais e astrofísicos.

Atualmente, há um grande número de grupos de pesquisa espalhados pelo país. Na subárea de fusão, temos três laboratórios: i) no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, está em operação o tokamak TCABR, construído para estudos de aquecimento auxiliar, regime de operação de alto confinamento e turbulência na borda do plasma, entre outros objetivos; ii) no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em São



José dos Campos (SP), está instalado o tokamak esférico ETE (Experimento Tokamak Esférico), no qual se investiga uma configuração magnética de alto desempenho; iii) o Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas tem o tokamak NOVA. Em 2007, refletindo o importante papel estratégico das pesquisas sobre plasmas de fusão, o Ministério da Ciência e Tecnologia criou a Rede Nacional de Fusão, sob os auspícios da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Para centralizar as atividades futuras na área de fusão, encontra-se em fase de criação o Laboratório Nacional de Fusão (LNF), a ser construído em Sorocaba (SP).

Há, no país, mais de uma dezena de grupos dedicados ao estudo de plasmas tecnológicos e que contam com a colaboração de especialistas de outros campos, como químicos e engenheiros. Alguns dos projetos em andamento nesses grupos contemplam o processamento de materiais de interesse aeroespacial; materiais elétricos e biocompatíveis; polímeros e cerâmicas; bem como o tratamento de superfícies de materiais metálicos com inúmeras aplicações tecnológicas.

Vale destacar também os trabalhos envolvendo duas frentes de pesquisa: i) jatos de plasma, usados para aquecimento, corte e na técnica denominada *spray* de plasma (jato de plasma para depositar algum material sobre um substrato); ii) implantação iônica por imersão em plasma, para melhorar as propriedades mecânicas de materiais.

Na subárea de plasmas espaciais e astrofísicos, o Brasil conta com grupos de pesquisa bem estabelecidos, que fazem estudos teóricos, computacionais e observacionais de diversos fenômenos, como a evolução dinâmica de estrelas, nuvens interestelares, buracos negros, pulsares (estrelas diminutas e densas), supernovas (estrelas massivas que explodem ao final da vida), discos de acreção (material difuso em órbita de um corpo celeste) etc. Outros estudos envolvem a produção e aceleração de partículas astrofísicas; reconexão magnética (padrões das linhas do campo magnético); e o chamado efeito dínamo, o qual explica a formação de campos magnéticos de corpos celestes, como planetas e estrelas.

Uma importante linha de pesquisa refere-se ao chamado clima espacial, que envolve o estudo de vários aspectos da interação entre o Sol e a Terra – em particular, a resposta do ambiente espacial à intensa atividade de nossa estrela. As explosões e ejeções do Sol lançam uma quantidade muito grande de partículas energéticas que alcançam a Terra, provocando tempestades geomagnéticas, as quais afetam as telecomunicações e até mesmo as propriedades da camada de ozônio que circunda nosso planeta.

O estudo de fenômenos básicos de plasma é objeto de pesquisa de vários grupos de pesquisa no Brasil, muitos deles formados nos últimos 10 anos. Uma das linhas de investigação refere-se ao estudo de caos e fenômenos não lineares, com aplicações à física de plasmas de fusão (por exemplo, a turbulência que ocorre na borda de tokamaks)

e de aceleradores de partículas baseados nesse estado da matéria (por exemplo, estudos de instabilidades nos feixes de partículas relativísticas aceleradas).

## PROBLEMAS EM ABERTO

Em todas as subáreas que citamos, há diversos problemas em aberto que devem pautar as pesquisas futuras e o próprio desenvolvimento da física de plasmas no país. A rápida evolução da tecnologia envolvendo novos materiais é um motor de avanços contínuos na subárea de plasmas tecnológicos.

Embora a geração de plasmas frios nessa subárea não envolva investimentos de grande monta, a instrumentação necessária para medições e análises é bastante onerosa, exigindo contínua atualização. Além disso, a formação de recursos humanos deve contemplar a inclusão de técnicas de plasmas tecnológicos no currículo das escolas de engenharia, algo ainda incipiente em nosso país.

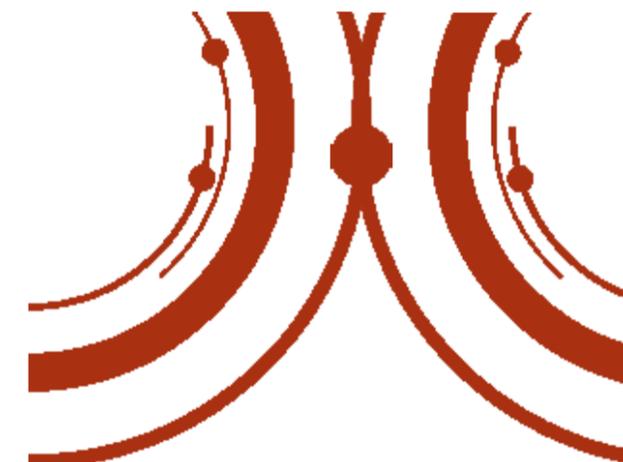
O mesmo problema de formação de pessoas é também um problema futuro para a área de plasmas de fusão, já que um tokamak, máquina de grandes proporções, necessita de um grande número de especialistas em técnicas de diagnósticos, vácuo, eletrônica de potência, bem como profissionais da área de informática com treinamento específico em certas ferramentas computacionais (métodos numéricos) para projetar experimentos nessa área.

A existência de grandes projetos internacionais visando à obtenção de fusão termonuclear controlada por confinamento magnético de plasmas é um dos principais fatores de motivação para o desenvolvimento dessa área em nosso país – sobretudo por meio do LNF.

Grandes projetos internacionais serão também importantes no desenvolvimento da área de plasmas espaciais no Brasil. O país já tem participação nos telescópios Gemini e SOAR (sigla, em inglês, Observatório Meridional para Pesquisa Astrofísica), localizados no Chile e Havaí (EUA).

Outro projeto em que pesquisadores brasileiros participaram é o Corot (sigla, em inglês, para Convecção, Rotação e Trânsitos Planetários), cujo objetivo era a detecção e o estudo de oscilações estelares, bem como a procura de planetas extrassolares.

Vale também menção especial a dois projetos planejados e construídos no Brasil: o BBS (sigla inglesa para Espectroscópio Solar Brasileiro) e o BDA (Rede Decimétrica Brasileira).





# Pesquisa em ensino de física

*Passado, presente e futuro de um campo interdisciplinar do conhecimento*

Referência na educação básica e superior, a área de pesquisa em ensino de física no Brasil – sempre em ressonância com as tendências mundiais – apresenta atualmente grande diversidade de ideias e linhas de investigação, bem como crescimento significativo de instituições formadoras de pesquisadores.

Hoje, consolidado no país, esse campo social e interdisciplinar de formação do conhecimento é importante referência para o ensino de física tanto na educação básica quanto na superior, razão pela qual desempenha papel fundamental na formação científica da juventude brasileira.

CRISTIANO MATTOS

*Universidade de São Paulo*

NILSON GARCIA

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

SHIRLEY GOBARA

*Universidade Federal de Mato Grosso do Sul*

ANDRÉ FERRER

*Universidade Federal do Rio Grande do Norte*

FERNANDA BOZELLI

*Universidade Estadual Paulista*



O campo de pesquisa em ensino de física no Brasil tem suas primeiras manifestações na década de 1970, no âmbito das atividades da Sociedade Brasileira de Física (SBF). Para acompanhar essa trajetória de quase 50 anos de história, é necessário, entretanto, compreender seu objeto de estudo.

A produção de conhecimento na área de pesquisa em ensino de física é distinta daquela oriunda da pesquisa em física. Enquanto esta última área investiga os fenômenos naturais – das dimensões subatômicas às galácticas, das energias mais tênues às mais intensas –, a pesquisa em ensino de física examina o fenômeno de produção e uso do conhecimento físico pelos seres humanos.

Esse tipo de investigação, por estar relacionado aos processos educativos, dá-se em diversos lugares: do sistema formal (ou informal) de ensino ao cotidiano das pessoas. Além disso, é essencialmente um campo de investigação interdisciplinar, inserido em um contexto mais amplo: aquele da produção de conhecimento vinculada à área das ciências humanas aplicadas.

## BREVE HISTÓRIA

A atividade educacional de produção e reprodução do conhecimento científico remonta à própria história humana. A física – que, gradativamente, desvinculou-se da chamada filosofia da natureza e ganhou independência como campo de conhecimento – está associada ao seu ensino, uma atividade social que acompanha o próprio desenvolvimento dessa ciência e é realizada tanto nas instituições formais de ensino e pesquisa quanto em espaços não formais (museus, teatros, parques etc.). Como área de estudo, entretanto, se comparada à pesquisa em física, é ainda um campo científico relativamente novo.

No Brasil, o ensino de física remonta ao período do Império, com a instalação da Família Real no país, no início do século 19. Nesse período, a educação brasileira sofria forte influência francesa, de caráter humanístico, em que as disciplinas científicas eram praticamente excluídas do currículo. Esse foi o quadro dominante não só no ensino de física, mas também naquele voltado para as ciências – nosso sistema educacional à época era caracterizado pela reprodução de modelos europeus de ensino.

Esse cenário se modificou na segunda metade do século passado, em decorrência, principalmente, da elaboração de grandes projetos de ensino das disciplinas científicas por parte de países como os EUA.

Em meados da década de 1950, foram elaborados projetos curriculares de ensino de física, química, biologia e matemática por equipes compostas por diferentes especialistas, como professores de ciências, cientistas, psicólogos, pedagogos, editores, jornalistas, entre outros, visando organizar um ensino de ciências que respondesse às necessidades formativas propostas pelo governo norte-americano da época, decorrentes do contexto mundial pós-Segunda Guerra.

Pela repercussão internacional provocada, essa transformação na esfera educacional acabou sendo tomada como um marco no ensino de ciências, pois testemunhou a emergência de novos referenciais sobre conhecimento, aprendizagem, concepções didáticas e curriculares.

Pode-se assim dizer que a pesquisa em ensino de física e das demais ciências da natureza começou a tomar corpo, atribuindo-se seu início ao final da década de 1950, período conhecido, na história da educação em ciências, como a ‘era dos projetos’.

Esse movimento internacional repercutiu no Brasil, de forma que, a partir da segunda metade da década de 1960, formaram-se grupos de pesquisadores para produzir projetos nacionais de ensino de física, entre os quais se destacam o Projeto de Ensino de Física (PEF), o Física Auto Instrutiva (FAI) e o Projeto Brasileiro de Ensino de Física (PBEF), desenvolvidos no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). Essas iniciativas exerceram forte influência na organização do campo de investigação em ensino de física.

Decorrente dessas e de outras atividades correlatas, foi estabelecida, no IFUSP, em 1973, a primeira pós-graduação interunidades em ensino de física no Brasil, marco do início da institucionalização da pesquisa na área. Essa pós-graduação interunidades – compartilhada pelo Instituto de Física e pela Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo – denotou claramente o objeto de pesquisa interdisciplinar da área, evidenciando, já à época, uma diferenciação na formação de pesquisadores em ensino de física e daqueles dedicados à pesquisa em física ou educação. Os primeiros deveriam ter uma formação interdisciplinar, isto é, tanto em física quanto em educação.

Simultaneamente, no âmbito do programa da pós-graduação em física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), também no início da década de 1970, foi criada uma linha de pesquisa em ensino na qual os estudantes de mestrado em física poderiam desenvolver pesquisas e defender suas dissertações versando sobre temáticas de ensino de física.

Desde sua criação em 1966, a SBF, em consonância com esse movimento, estabeleceu, na estrutura organizacional de sua diretoria, uma Secretaria para Assuntos de Ensino. Uma das primeiras ações dessa secretaria foi a organização do 1º Simpósio Nacional de Ensino de Física (1º SNEF), ainda em 1970, no IFUSP.

Em 1979, visando divulgar as pesquisas da área e estabelecer um contato com seus sócios e a comunidade em geral, criou-se a *Revista de Ensino de Física (REF)*, cujo nome foi alterado posteriormente para *Revista Brasileira de Ensino de Física*, que segue sendo editada até hoje.

Na década de 1980, com o crescimento das atividades na área de ensino de ciências, foi desenvolvido o subprograma Educação para a Ciência, fundamental para a expansão, organização e consolidação dessa nova área de pesquisa. Essa iniciativa era vinculada ao Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico e apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

Diversos grupos de pesquisa foram formados, o que contribuiu para a criação de vários cursos de pós-graduação em ensino de ciências, os quais, por sua vez, ajudaram a consolidar núcleos de pesquisa e a ampliar o número de pesquisadores em ensino de física no país.

Em 1985, com o crescimento de profissionais interessados na pesquisa em ensino de física e visando melhor caracterizar esse novo campo de investigação, foi proposta a realização de um evento focado exclusivamente nesse tema. Esse encontro ocorreu em 1986, durante a reunião da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, em Curitiba. Esse foi o 1º Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (1º EPEF), de natureza distinta do SNEF.

Em 2000, na Capes, foi criada a área de pesquisa em ensino de ciências e matemática, ampliando a possibilidade de formação de profissionais de alto nível nesses campos

de conhecimento. Isso se deu em decorrência do vertiginoso crescimento dessa área de pesquisa – quase uma centena de cursos de pós-graduação na última década e linhas de investigação em ensino de física vinculadas a diversos programas de pós-graduação em educação e em ciências/física.

Acompanhando esse movimento, no âmbito da SBF, foi criada, em 2008, a Área de Pesquisa em Ensino de Física e, na oportunidade, constituída a Comissão de Área de Pesquisa em Ensino de Física (CAPEF) – da qual os autores deste artigo são seus integrantes atuais.

## EVOLUÇÃO NO PAÍS

No Brasil, a pesquisa em ensino de física – tipicamente desenvolvida nas universidades com estudantes de pós-graduação – acompanha as tendências da pesquisa em ensino de física no mundo.

Aspecto fundamental a ser enfatizado na constituição desse campo de pesquisa aqui no Brasil – que se deu em torno da década de 1970 – é que as investigações, em geral, foram inicialmente desenvolvidas por físicos. Estes, baseados em fundamentos teórico-metodológicos oriundos das ciências humanas (e não da física), começaram a desenvolver seus trabalhos sobre ensino e aprendizagem de conhecimentos disciplinares, caracterizando o campo como eminentemente interdisciplinar.

A constituição do objeto de investigação da pesquisa em ensino de física está historicamente relacionada à origem e evolução da pesquisa em ensino em ciências. Nesse sentido, na década de 1950 e na seguinte, influenciado pelos movimentos de inovação curricular norte-americano e inglês, o modelo de ensino – também aqui no país – passou a ser centrado na redescoberta e na participação ativa dos estudantes.

Naquele período, por influência do contexto internacional, os projetos de ensino de ciências se apoiavam na concepção empirista/indutivista, com influências comportamentalistas, ou seja, havia uma ênfase na experimentação, com o intuito de desenvolver atitudes e habilidades nos alunos para observar, medir e comparar, para descobrir leis e teorias, relacionando esse procedimento ao método da ciência. Essas propostas passaram a ser temas de investigação também no Brasil, com o objetivo de: i) conhecer, aplicar e avaliar essas novas propostas; ii) contribuir para a melhoria e reformulação do sistema educacional da época.

Consequentemente, as temáticas de interesse se relacionavam tanto ao desenvolvimento curricular quanto a propostas de adaptação e/ou intervenção em sala de aula, bem como à produção de materiais didáticos para o ensino secundário e/ou universitário. Essas linhas de investigação – basicamente fundamentadas em metodologias quantitativas de pesquisa – são identificadas como precursoras da pesquisa brasileira em ensino de ciências e reconhecidas por sua natureza aplicada, do tipo ‘pesquisa e desenvolvimento’.

Na década de 1970, com o insucesso das propostas para o ensino por redescoberta, desencadearam-se novas discussões na comunidade científica brasileira da área, culminando no movimento denominado ‘concepções alternativas’. Tal movimento evidenciou – em ressonância com o que ocorria no exterior – uma nova visão de ciência baseada no pressuposto filosófico (mais especificamente, epistemológico) segundo o qual a ciência é construída e compreendida a partir da interação entre sujeito e objeto.

Na tentativa de buscar respostas aos problemas levantados sobre as concepções alternativas ou espontâneas, a pesquisa em ensino de física no Brasil foi também influenciada por outro movimento, o da mudança conceitual, o qual postulava a substituição da antiga ideia (concepção prévia) dos estudantes por uma nova ideia (científica) e que

balizou várias investigações entre a década de 1980 e o final do século passado. Esse movimento caracterizou-se, basicamente, pela compreensão de que o ensino poderia levar à superação definitiva das concepções alternativas em favor das ideias científicas.

Dada a pluralidade e interdisciplinaridade da área e o resultado pouco expressivo do modelo de mudança conceitual, foram propostas outras abordagens que, influenciadas por paradigmas construtivistas, levavam em conta as diferentes concepções dos estudantes – por exemplo, o ensino por investigação e o perfil conceitual. Esta última proposta é um modelo alternativo ao modelo da mudança conceitual, ao considerar a evolução das ideias dos estudantes, em sala de aula, não como uma substituição às ideias científicas, mas como a evolução de um perfil de conceitos em que as novas ideias apreendidas passam a conviver com as ideias anteriores e a serem usadas em contextos específicos.

Entre as décadas de 1980 e 1990, outras abordagens ou linhas temáticas de pesquisa foram, também, exploradas pela pesquisa em ensino de física no Brasil, tais como: resolução de problemas; representações mentais construídas pelos alunos; formação inicial e continuada de professores; física do cotidiano; equipamentos de baixo custo; ênfases curriculares em ciência, tecnologia e sociedade; história e filosofia da ciência; física moderna e contemporânea; e o uso de tecnologias na educação.

Os estudos retrospectivos da área revelaram que, nos últimos 40 anos, a pesquisa em ensino de ciências/física no Brasil vem crescendo e evoluindo acentuadamente – sobretudo, na última década. Novas ideias e linhas de pesquisa foram introduzidas na área, associadas a novos campos de conhecimento e referenciais teóricos. Houve também um crescimento significativo de instituições formadoras de pesquisadores.

Uma das consequências desse cenário é que cresceram os intercâmbios internacionais.

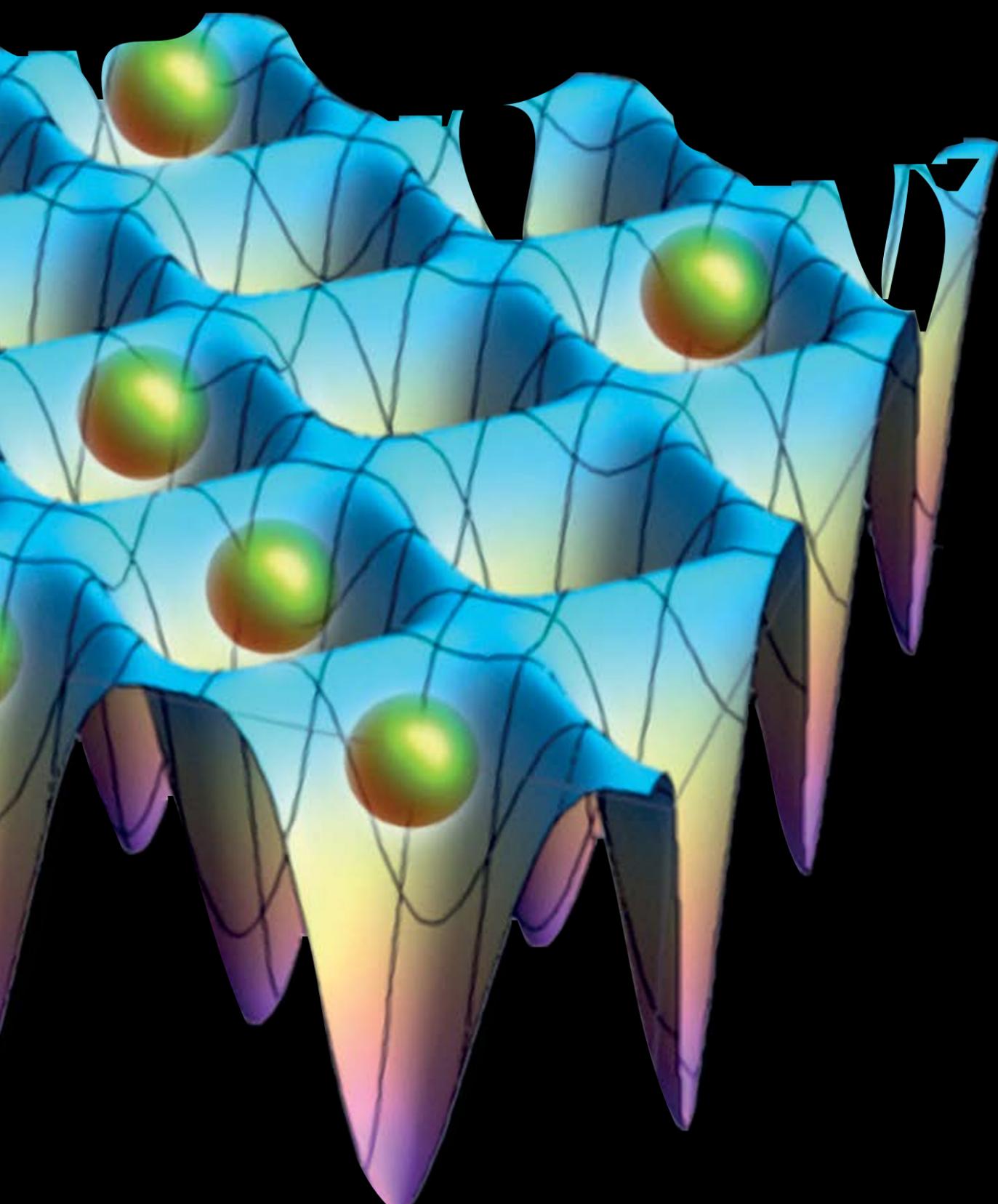
## ALGUMAS TENDÊNCIAS

Assim, no contexto tanto internacional quanto brasileiro, é possível destacar algumas tendências em função desse crescimento, como os estudos sobre as relações entre ‘linguagem e cognição’; o uso das ‘novas tecnologias de informação e comunicação’; e as abordagens ‘ciência, tecnologia e sociedade’. Nesta última, em particular, surgem interesses marcadamente vinculados aos problemas da sociedade e se favorecem propostas do tipo intervencionista, fato observado em diferentes reconstituições da trajetória histórica da área.

No Brasil, outras tendências envolvem diversos aspectos relacionados à ‘formação de professores’, de extrema importância nos dias atuais e cujos problemas de investigação se estendem desde o preparo inicial até a formação continuada de professores em serviço (ver nesta edição ‘Professor de física neste século’).

Além disso, as diversas linhas de pesquisa propostas nos eventos temáticos da área são reflexos da diversidade de tendências, demonstrando a amplitude dos problemas abordados na área e seu caráter multiparadigmático.

Acompanhando essas tendências – e sendo um campo social e interdisciplinar de produção de conhecimento –, a área de pesquisa em ensino de física, por meio da produção de seus pesquisadores, professores e alunos, tem se consolidado como uma importante referência ao ensino de física tanto na educação básica quanto na superior, razão pela qual desempenha papel fundamental na formação científica da juventude brasileira.



# Física atômica e molecular

*Dos bilhões de partículas à revolução das entidades quânticas isoladas*

Há cerca de 50 anos, é provável que qualquer físico duvidasse bastante da possibilidade de isolar entidades quânticas, como um átomo ou uma molécula. Um eminente físico chegou mesmo a dizer que isso seria comparável a criar dinossauros em jardins zoológicos. Hoje, contrariando essa crença, esses 'animais pré-históricos' são fatos corriqueiros em vários laboratórios de física do mundo.

Aprisionar um único átomo e fazê-lo interagir com apenas uma partícula de luz ou resfriar uma molécula a temperaturas baixíssimas com a ajuda de um *laser* são avanços que modificaram significativamente não só os rumos da chamada física atômica e molecular, mas também de várias tecnologias aliadas a ela, propiciando o surgimento de áreas ligadas à informação, a computadores ultravelozes e relógios ultraprecisos.

ROBERTO RIVELINO DE MELO MORENO  
*Grupo de Nanoestruturas Moleculares e Materiais  
Nanoestruturados, Instituto de Física,  
Universidade Federal da Bahia*



A física atômica e molecular dedica-se ao estudo das propriedades físicas de átomos, moléculas, aglomerados atômicos e moleculares, bem como de suas interações com a radiação eletromagnética ou com partículas massivas, como elétrons, nêutrons e pósitrons (antipartículas do elétron).

Os sistemas de interesse podem estar isolados em vácuo, em forma de gás ou dispersos em um meio. O estudo da interação de um sistema atômico ou molecular com a radiação eletromagnética origina diferentes tipos de espectroscopia atômica ou molecular. Nessa técnica, um feixe de radiação incide sobre uma amostra, e a luz devolvida ao meio e apropriadamente detectada – tecnicamente, denominada espectro – carrega informação sobre, por exemplo, os tipos de átomos que compõem o material estudado.

Método semelhante empregado pela física atômica e molecular é lançar contra as moléculas de um material um feixe de partículas massivas (de elétrons, por exemplo), que sofrem espalhamento – ou seja, são desviadas por conta das colisões. Também nesse caso é possível obter uma descrição detalhada do alvo, bem como de suas propriedades, com base nos ângulos

de desvios das partículas incidentes.

Um pesquisador dessa área desenvolve métodos teóricos ou experimentais para descrever e fazer as previsões dos fenômenos envolvendo átomos, moléculas e seus aglomerados. Mais comumente, ele empregará a teoria apropriada para a descrição microscópica dos sistemas estudados: a mecânica quântica, que trata dos fenômenos nas dimensões moleculares, atômicas e subatômicas.

Geralmente, a mecânica quântica proporciona um ferramental excelente para lidar com sistemas não muito complexos, ou seja, constituído por poucos corpos (átomos ou moléculas, por exemplo). No entanto, a natureza nem sempre nos oferece esse cenário mais simples, e a descrição obtida com essa teoria começa a se tornar intratável para certos sistemas.

Para lidar com a complexidade de certos sistemas moleculares – aqueles que vão muito além de uma simples molécula, por exemplo –, os físicos da área, em alguns casos, são obrigados a apelar para métodos da física clássica – ou seja, aquela que trata dos fenômenos macroscópicos de nosso dia a dia.

Um exemplo de metodologia clássica nesse campo é a segunda lei de Newton – referência ao físico britânico Isaac Newton (1642-1727) –, usada para descrever o movimento dos átomos ou o enovelamento de uma cadeia atômica em uma molécula muito grande – como ocorre com uma proteína ou com o DNA, por exemplo.

Empregam-se também métodos da física clássica para estudar o efeito de um solvente – água é o mais comum deles – sobre uma molécula ou, até mesmo, o comportamento de sistemas líquidos quando as partes destes atingem uma temperatura comum – o chamado equilíbrio termodinâmico.

## O ÚLTIMO MEIO SÉCULO

Na década de 1960, a física atômica e molecular era considerada um dos campos bem estabelecidos da física e já havia atingido grande maturidade experimental e teórica. De fato, muitos dos avanços que levaram ao seu desenvolvimento ocorreram ainda no século 19.

Assim, há cerca de 50 anos, vislumbravam-se poucos avanços nesse campo, e o grande tema de interesse para a área era uma linha de pesquisa ‘convencional’, iniciada ainda no século anterior: a obtenção de espectros atômicos e moleculares de alta resolução para sistemas moleculares relativamente simples.

Com os espectros detalhados – obviamente, com mais precisão do que no passado, graças ao desenvolvimento de novas técnicas e equipamentos –, tornava-se possível conhecer propriedades fundamentais de átomos e moléculas.

Mas, para melhorar significativamente a resolução espectroscópica, foi preciso surgir um conhecimento que traria grande impulso à área: aprender como manipular os estados atômicos com luz, a partir do desenvolvimento de métodos de bombeamento óptico. Essa técnica leva, por injeção de luz, a maior parte de uma população de átomos de uma amostra para estados energeticamente mais altos (estados excitados, tecnicamente) – daí ser chamada também de inversão de população.

Com essas novas técnicas, um feixe de luz polarizada – cujas ondas eletromagnéticas vibram em um só plano – atinge os constituintes da amostra de modo bem específico. Assim, os átomos ou as moléculas do material ganham energia e ficam excitados por frações de segundo, devolvendo, em seguida, essa radiação absorvida na forma de luz, cuja análise permite, mais uma vez, determinar a constituição e propriedades da amostra.

Esse desenvolvimento também impulsionou a própria óptica como área de pesquisa e levou a uma profunda mudança na física atômica e molecular. Ainda na década de 1960, os métodos de bombeamento ópticos resultaram no controle da amplificação da luz por emissão estimulada de radiação – ou seja, no desenvolvimento do *laser* –, revolucionando ainda mais os experimentos com a matéria em nível atômico, principalmente com o aumento da sensibilidade e precisão das medidas.

Também na década de 1960, começava a nascer a chamada teoria do funcional da densidade – mais conhecida pela sigla DFT – desenvolvida pelo físico austro-americano Walter Kohn (1923-2016), pelo franco-americano Pierre Hohenberg e pelo sino-britânico Lu Jeu Sham. Essa teoria é atualmente muito usada para estudar as propriedades dos elétrons em átomos, moléculas, agregados moleculares, nanopartículas, líquidos e sólidos (ver ‘Física da matéria condensada e dos materiais’ nesta publicação).

A DFT se juntou a um arsenal de métodos teórico-computacionais bem-sucedidos para investigar a estrutura eletrônica de uma variedade de sistemas de interesse. Além disso, também na década de 1960, iniciaram-se o desenvolvimento e a implementação de métodos para estudar o espalhamento de elétrons por moléculas. Duas décadas mais tarde, os métodos teóricos de estrutura eletrônica ganharam avanços enormes com o desenvolvimento de métodos computacionais eficientes e de computadores cada vez mais velozes.

O desenvolvimento de métodos teórico-computacionais na química quântica, juntamente com a DFT, rendeu o prêmio Nobel de Química de 1998 a Kohn e ao químico britânico John Pople (1925-2004). Mais tarde, em 2013, o austro-americano Martin

Karplus, o israelo-britânico Michael Levitt e o israelo-americano Arieh Warshel receberam o Nobel de Química pelo desenvolvimento de modelos computacionais (ditos de multiescala) para tratar processos moleculares ainda mais complexos.

## ICTIOSSAUROS NO ZOO

Nos últimos 50 anos, o tamanho dos sistemas de interesse em física atômica e molecular foi reduzido de amostras contendo bilhões de partículas (átomos ou moléculas) para aquelas contendo poucos desses constituintes, em experimentos feitos em temperaturas perto do zero absoluto (cerca de 273 graus celsius negativos).

Da mesma forma, o aprimoramento dos *lasers* permitiu a realização de experimentos com um único átomo interagindo com uma única partícula de luz (fóton). Esse avanço – quase inimaginável se comparado aos primórdios da espectroscopia atômica – abriu caminho para a era da informação quântica e para o desenvolvimento de relógios atômicos ultraprecisos.

Para se ter uma ideia sobre tais avanços, em artigo publicado em 1952, o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) – um dos fundadores da mecânica quântica – acreditava ser algo apenas ideal pensar em experiências com partículas quânticas individuais, fazendo uma analogia com “criar ictiossauros no jardim zoológico”.

Entretanto, contrariando a crença de Schrödinger, o prêmio Nobel de Física de 2012 foi concedido aos físicos Serge Haroche, francês, e David Wineland, norte-americano, exatamente pelo desenvolvimento de experiências com sistemas quânticos individuais, sem destruí-los. Atualmente, vivemos a era do controle dos estados atômicos e do resfriamento de átomos com luz de *lasers*.

Enquanto os experimentos convergem para o estudo de átomos e moléculas individuais – quase isolados ou aprisionados em campos eletromagnéticos ou em gaiolas moleculares –, os métodos teóricos convergem para o tratamento de sistemas cada vez maiores e mais complexos.

Esses dois rumos impulsionaram – de certa forma, em sentidos quase opostos – o campo da física atômica e molecular e possibilitaram grandes avanços em outras áreas de pesquisa.

## INTERDISCIPLINARIDADE

Ao longo de seu desenvolvimento, a física atômica e molecular também construiu pontes com outros campos da física e outras áreas das ciências, incluindo, por exemplo, a física da matéria condensada, a astrofísica, a química e, mais recentemente, a biologia.

Desses encontros interdisciplinares, podemos destacar o surgimento da nanociência, semeada pelo físico norte-americano Richard Feynman (1918-1988), em uma palestra proferida em 1959, e popularizada como nanotecnologia, a partir da década de 1980, com as propostas do engenheiro norte-americano Kim Drexler.

A nanotecnologia tem como objetivo a compreensão e o controle da matéria em escala atômica, molecular e supramolecular, visando à construção de dispositivos microscópicos engenhosos e eficientes.

O termo supramolecular diz respeito a arranjos moleculares que se auto-organizam, por meio de in-

terações intermoleculares – processo também conhecido como automontagem molecular. Por exemplo, aminoácidos (‘tijolos’ das proteínas) podem se auto-organizar em disposições cilíndricas conhecidas como nanotubos orgânicos, nos quais a estrutura tubular é mantida apenas por forças intermoleculares – especificamente, entre os átomos de hidrogênio presentes nessas moléculas complexas.

Nesse contexto, é possível conceber dispositivos eletrônicos operando com uma molécula ou com um número muito reduzido delas.

## O QUE HÁ DE NOVO NO FRONT?

Atualmente, a física atômica e molecular continua tratando dos problemas que envolvem os blocos fundamentais da matéria. Porém, atuando na fronteira dos grandes mistérios da natureza.

Um desses problemas diz respeito à assimetria entre matéria e antimatéria (ver ‘Física de partículas e campos’ nesta publicação) que se observa hoje no universo – nos instantes iniciais do cosmo, ambas teriam sido criadas na mesma proporção, havendo hoje, no entanto, muito mais da primeira do que da outra.

A física de átomos exóticos – um átomo de antimatéria, com núcleo negativo e elétrons positivos (pósitrons) – foi impulsionada graças aos recentes experimentos de física das partículas elementares. No início deste ano, um grupo de pesquisadores, com a participação de brasileiros, associados ao Centro Europeu de Pesquisas Nucleares, na Suíça, publicou um trabalho no periódico *Nature* (21/01/2016), determinando a neutralidade da carga do anti-hidrogênio com uma enorme precisão. Ou seja, o núcleo negativo, formado por um antipróton, neutraliza a carga elétrica positiva do pósitron. Esse resultado pode abrir um novo caminho para explicar, entre outras coisas, o que houve com a antimatéria após o processo que deu origem ao universo – o chamado Big Bang.

Outra linha de pesquisa que tem merecido a atenção da física atômica é a que estuda átomos ultrafrios. Com essa técnica, é possível confinar átomos em armadilhas ópticas espaciais, as quais permitem um estudo minucioso das propriedades de transporte do ‘pacote’ (*quantum*) de carga elétrica, efeito predito na década de 1980.

O resfriamento de átomos com *lasers* e o controle dos estados quânticos de sistemas individuais (átomos, moléculas etc.) vêm abrindo grandes perspectivas em metrologia, originando uma espécie de ‘engenharia quântica’, preocupada com as aplicações de medidas ultraprecisas das constantes da natureza.

Seguindo outra direção, os avanços conquistados pela física atômica e molecular vêm permitindo o estudo detalhado das propriedades quânticas de moléculas biológicas, bem como de processos que ocorrem em organismos vivos, resultando no desenvolvimento da ‘biologia quântica’.

Podemos arriscar dizer que Schrödinger – também autor do clássico *O que é vida? O aspecto físico da célula viva* (1944) – ficaria surpreso com os desenvolvimentos tanto de uma área que ele nem mesmo achava possível existir há pouco mais de 60 anos quanto de uma teoria – a mecânica quântica – que ele ajudou a criar.

E, certamente, a física atômica e molecular reserva muitas outras supresas para os anos que virão.



# Física médica

*Na interface de uma ciência da natureza com suas aplicações à saúde*

No diagnóstico e tratamento de tumores, na proteção radiológica de trabalhadores, no controle de qualidade de equipamentos hospitalares, na precisão de doses de radiação aplicadas em pacientes, no planejamento de instalações radiativas, na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias médicas, na formação de profissionais de saúde. Esses são exemplos de uma longa lista de áreas nas quais atua a física médica. Com presença no ambiente clínico e hospitalar, bem como na indústria de equipamentos de diagnóstico e terapia, essa especialidade da física vem crescendo na direção de alcançar, em um futuro próximo, a chamada medicina personalizada.

ANA MARIA MARQUES DA SILVA  
*Faculdade de Física,  
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul*



Ao longo da história, as tecnologias da medicina vêm se beneficiando da aplicação de fenômenos e técnicas experimentais da física, como os raios X, a ressonância magnética nuclear, o ultrassom, os aceleradores de partículas, a marcação de radioisótopos (núcleos radioativos) e as técnicas de detecção da radiação.

Muitas dessas tecnologias têm amplo uso no ambiente clínico, como as técnicas de diagnóstico por imagens (nas tomografias computadorizada por raios X e por emissão de pósitrons) e as técnicas radioterápicas, que permitem distintas formas de tratamentos baseados em feixes de elétrons e raios X de alta energia. Tais contribuições vêm revolucionando as formas de visualização da estrutura anatômica e funcional do corpo humano e o tratamento de doenças.

A física médica (ou física aplicada à medicina) é reconhecida como uma especialidade da física. Os físicos médicos atuam tanto no ambiente clínico, na consultoria e no ensino aos profissionais da saúde quanto na pesquisa e no desenvolvimento de novas tecnologias médicas.

Existem organizações profissionais de física médica, como a AAPM (sigla, em inglês, para Associação Norte-americana de Física Médica), a IOMP (sigla, em inglês, para Organização Internacional de Física Médica) e a ABFM (Associação Brasileira de Física Médica), que buscam divulgar, desenvolver e garantir a qualidade da atuação de seus profissionais.

O reconhecimento da profissão é internacionalmente apresentado na ISCO-08 (sigla, em inglês, para Classificação Padrão Internacional de Ocupações), da ILO (Organização Internacional do Trabalho), que coloca o físico médico no grupo dos físicos e dos astrônomos (sob o código 2111) e indica, em nota, que o físico médico é parte integrante da equipe interdisciplinar de saúde.

No ambiente hospitalar, cada vez mais, o físico médico é chamado a contribuir com o aconselhamento científico e tecnológico na consultoria clínica, na pesquisa, no ensino de profissionais da saúde e na busca de soluções para os numerosos e diversos problemas que surgem nas especialidades médicas. No Brasil, a atuação dos físicos médicos iniciou-se formalmente nos serviços de radioterapia e medicina nuclear na década de 1960.

A área mais tradicional de atuação dos físicos médicos é a radioterapia, na qual eles prestam um serviço indispensável para a garantia da precisão da aplicação de radiação a partir de fontes empregadas no tratamento de câncer. No Brasil, essa atuação é alvo de regulamentação específica da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e do Ministério da Saúde, em consonância com as orientações da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, na sigla em inglês), que exigem a presença desse profissional em instalações de radioterapia.

Da mesma forma, nas instalações de medicina nuclear e produção de radioisótopos, o físico médico atua na proteção radiológica, na garantia da qualidade dos equipamentos e no processamento das imagens para a determinação de parâmetros fisiológicos (por exemplo, taxas metabólicas e fluxo sanguíneo).

Os físicos médicos também lideram a investigação de novos equipamentos de diagnóstico, gerenciam sistemas de controle de qualidade nas diversas áreas do radiodiagnóstico, realizam o planejamento de instalações radiativas e são responsáveis pela

proteção radiológica e pelo controle de danos causados por radiação, tanto em pacientes quanto em trabalhadores.

Nos últimos 50 anos, os físicos têm liderado o desenvolvimento e a aplicação de aceleradores de partículas no tratamento de câncer. Inicialmente confinados a laboratórios de pesquisa, os aceleradores lineares produzem feixes de elétrons ou raios X altamente energéticos e fornecem doses capazes de destruir as células cancerígenas e impedir o crescimento de tumores.

Apesar de a concepção e os primeiros estudos experimentais terem ocorrido na década de 1950, apenas no final da década de 1990 a radioterapia por feixe de hádrons (por exemplo, prótons, nêutrons, íons etc.) passou a ser implementada clinicamente nos grandes centros internacionais e empregada com sucesso no caso de tumores resistentes.

Uma técnica avançada IMRT (sigla, em inglês, de radioterapia de intensidade modulada) vem ampliando a habilidade para controlar tumores por meio da radiação. Essa técnica usa programas de planejamento que otimizam, com grande precisão, a forma do campo de tratamento. Isso é obtido por meio de colimadores, dispositivos que ‘estreitam’ o feixe de radiação do acelerador – fornecendo, desse modo, maior dose de radiação ao tumor –, enquanto minimizam aquelas que atingem tecidos saudáveis nas vizinhanças da região sob tratamento.

Em um programa nacional de grande amplitude, está sendo instalada uma fábrica de aceleradores lineares para radioterapia no país, o que vem exigindo a formação e qualificação de físicos médicos para atuação tanto no desenvolvimento quanto na operação desses equipamentos no ambiente hospitalar.

Essa demanda desencadeou, a partir de 2013, uma ação de financiamento do Ministério da Saúde, com bolsas para a formação de físicos médicos, na forma de residência multiprofissional, em instituições formadoras de físicos em radioterapia, medicina nuclear e radiodiagnóstico.

## EVOLUÇÃO DAS TERAPIAS

Mesmo com a física das partículas e os mecanismos de deposição de dose bem conhecidos, algumas questões ainda não são bem compreendidas e exigem mais investigações, como o fornecimento seguro de doses altas ao paciente, a resposta às doses e as complicações nos tecidos saudáveis. Apesar de o Brasil ainda não ter um centro de referência em radioterapia por hádrons, a preparação de físicos para o uso dessa nova tecnologia em ambiente clínico é necessária para o futuro.

Uma linha de pesquisa na terapia do câncer que vem avançando nas últimas décadas é a aplicação *in vitro* e *in vivo* de nanopartículas na radioterapia. Como a radioterapia não é seletiva em relação ao tumor, os pesquisadores têm, como desafio principal, aumentar a eficácia terapêutica sem causar dano aos tecidos saudáveis vizinhos.





O objetivo da combinação de nanopartículas que usam elementos de grande número atômico (ouro, ferro, titânio etc.) é ampliar o efeito diferencial entre a resposta à radiação do tecido saudável e do tumor à radiação, por meio da intensificação da produção dos chamados elétrons secundários, ou seja, aqueles arrancados da matéria (no caso, nanopartículas) pela radiação incidente. Tais investigações vêm sendo desenvolvidas por meio de simulações computacionais, além de estudos *in vitro* e experimentais.

Um dos principais benefícios do avanço dos métodos e recursos computacionais nos últimos anos é a solução de problemas de alto custo computacional – sobretudo, problemas de otimização e simulações. Assim, o planejamento radioterápico pode ser feito de forma individualizada e baseado em medidas da radiosensibilidade e nas respostas dos tecidos, obtidas a partir de imagens funcionais e anatômicas.

No futuro, os tratamentos devem avançar para uma combinação de terapias com feixes de fótons (partículas de luz) de alta energia, prótons, íons pesados, radionuclídeos (núcleos radioativos usados em medicina), drogas marcadas e ultrassom focalizado. Múltiplos planejamentos de tratamento poderiam ser preparados para selecionar um plano ótimo, baseado na chamada radioterapia em quatro dimensões (4D) – que sincroniza, em tempo real, a irradiação com a posição do tumor nas diferentes fases do ciclo respiratório – em conjunto com várias técnicas de imagens obtidas ao longo da terapia, ajustando os planejamentos em função da resposta.

As imagens poderiam ser usadas adaptativamente para corrigir movimentos involuntários dos pacientes e certas alterações anatômicas. Ferramentas computacionais que permitem levar em conta o risco em análises e tomadas de decisão (por exemplo, simulações personalizadas pelo método estatístico denominado Monte Carlo) poderiam ser amplamente usadas na dosimetria e no planejamento radioterápico.

Além disso, a combinação da radioterapia com a terapia genética poderia produzir benefícios para o paciente.

Uma área de interesse de tratamento médico, proveniente das pesquisas em óptica, é a fototerapia, que vem sendo empregada de modo mais amplo nos últimos anos – principalmente, na dermatologia e odontologia. A fototerapia se beneficiou com o desenvolvimento de *lasers* pulsados ou contínuos de menor custo.

Um tema de pesquisa importante, escolhido por grupos de física brasileiros, é a fototerapia dinâmica. Esse método terapêutico usa a absorção seletiva de um fotossensibilizador não tóxico ao tecido afetado, seguido da exposição a uma radiação de ‘cor’ (comprimento de onda) definida, que inicia um processo fotoquímico que destrói, preferencialmente, as células malignas.

## AVANÇOS NO DIAGNÓSTICO

O uso de imagens médicas é de fundamental importância para o gerenciamento de doenças e intervenções personalizadas, uma vez que elas permitem detectar, diagnosticar e monitorar mudanças patológicas, fisiológicas e moleculares. Nesse sentido, a ciência das imagens médicas é um campo dinâmico de pesquisa em física médica, envolvendo atividades multi e interdisciplinares, e vem crescendo rapidamente em seu escopo e importância.

A inovação no diagnóstico por imagens médicas vem sendo dirigida principalmente pelos avanços técnicos. Entre eles, destacam-se o desenvolvimento de novos materiais para detecção da radiação; a produção de campos mais intensos em equipamentos de ressonância magnética com materiais supercondutores; o uso de técnicas espectroscópicas ou novas metodologias de processamento e reconstrução tomográfica para a produção de imagens com melhor resolução e mais ‘limpas’ (ou, tecnicamente, com menor nível de ruído).

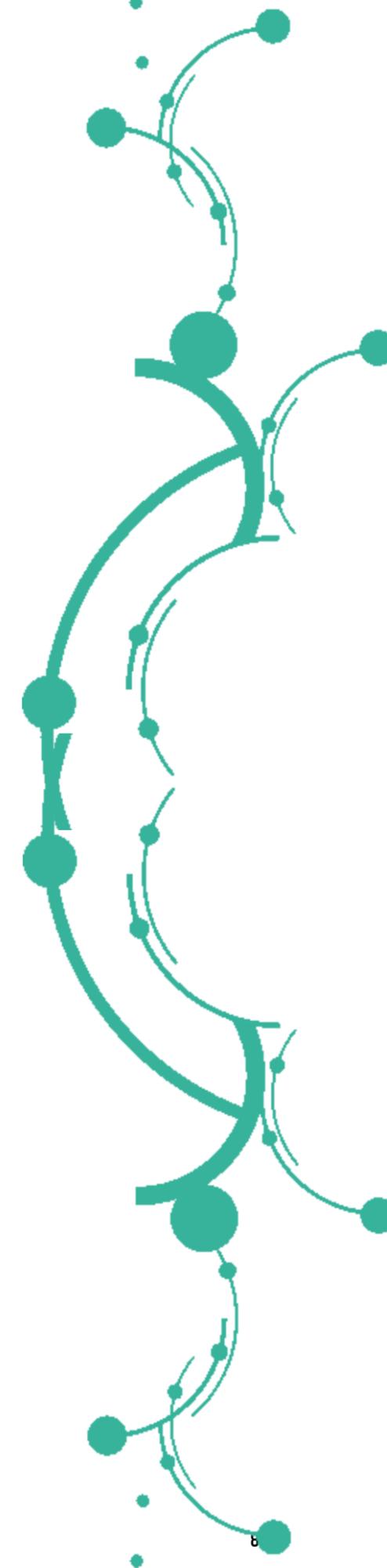
Computadores mais rápidos e poderosos vêm permitindo que métodos de análise de imagens médicas e algoritmos de processamento mais avançados possam ser usados para realçar as imagens e extrair novas informações – muitas vezes, quantitativas –, permitindo um diagnóstico mais acurado.

A criação e mineração de grandes bases de dados e imagens, usando técnicas computacionais, está possibilitando correlacionar dados multidimensionais, como genótipos e estruturas. Uma variedade de marcadores moleculares e agentes de contraste tem evoluído para produzir imagens celulares e moleculares para a pesquisa biológica avançada.

Apesar de a produção de imagens por raios X ter permanecido, desde sua concepção no final do século 19, essencialmente imutável, este século presenciou a substituição dos filmes radiológicos por detectores digitais de estado sólido. A principal limitação da qualidade da imagem por raios X é o ruído quântico associado à detecção do número finito de fótons, limitada pela exposição à radiação e à energia depositada nos tecidos, fatores que podem causar efeitos deletérios no paciente.

Mesmo que a maior eficiência e discriminação de energia dos novos detectores permita uma imagem de melhor qualidade, com menor ruído, a natureza da interação dos raios X com os átomos nos tecidos é limitada fundamentalmente pela diferença entre a probabilidade de absorção dos diferentes tecidos que produzem o contraste na imagem.

Ainda que a tecnologia de detecção se desenvolva com a ampliação da velocidade e resolução espacial, o compromisso entre a qualidade e a dose permanecerá, fazendo com que as pesquisas sejam direcionadas, sobretudo, para a segurança e redução das exposições de radiação ionizante na radiologia, mamografia, radiologia intervencionista e tomografia computadorizada, visando sempre ao bem-estar do paciente.



## ÁREAS DE ATUAÇÃO

No Brasil, uma área de atuação de físicos médicos é a dosimetria das radiações, diretamente relacionada ao controle das doses. Nesse campo, desenvolvem-se pesquisas experimentais e teóricas na produção de medidores de radiação (dosímetros) para uso pessoal e ambiental; na investigação de novos materiais para a medição da radiação (por exemplo, cristais naturais brasileiros e gel polimérico); e na simulação dos processos de interação da radiação com os tecidos biológicos por meio de simulações computacionais.

Outra área de atividade da física médica é a física nuclear aplicada, alavancada no país, a partir de 2006, com a disponibilidade de novos radiofármacos (fármacos acoplados a materiais radioativos) produzidos em centros privados, após autorização do governo federal. Além disso, o uso de detectores de estado sólido e o aumento do poder computacional vêm permitindo inovações tanto no *design* dos equipamentos quanto nas informações disponibilizadas para o diagnóstico.

Equipamentos que unem mais de uma modalidade de imagem permitem a fusão computacional de imagens funcionais e anatômicas – por exemplo, aqueles que combinam sistemas de tomografia por emissão de fóton único (SPECT) ou de pósitrons (PET) com a tomografia computadorizada por raios X e a ressonância magnética. A construção desses equipamentos exigiu vários avanços tecnológicos de compatibilização eletrônica das detecções.

Atualmente, o aumento na velocidade de aquisição das imagens e novos métodos de reconstrução tomográfica produzem imagens de maior qualidade, com menor tempo de obtenção. Além disso, algoritmos de reconstrução que incorporam os efeitos físicos da interação da radiação com a matéria permitem a melhoria da quantificação das imagens.

No Brasil, nos últimos 10 anos, a ampliação dos centros produtores de radioisótopos vem criando uma demanda pela produção de novos radiofármacos com aplicações em oncologia, neurologia e cardiologia. Isso tem impactado a área da física da medicina nuclear e exigido a formação de maior número de profissionais qualificados nesse segmento.

Em relação às imagens por ressonância magnética, os sistemas vêm sendo desenvolvidos com campos magnéticos cada vez mais intensos, mas com limitações visando à segurança do paciente. Uma das áreas de estudo é o comportamento de campos eletromagnéticos de alta frequência em meios condutores e em novos tipos de dielétricos (isolantes que, sob a ação de campos elétricos, passam a condutores).

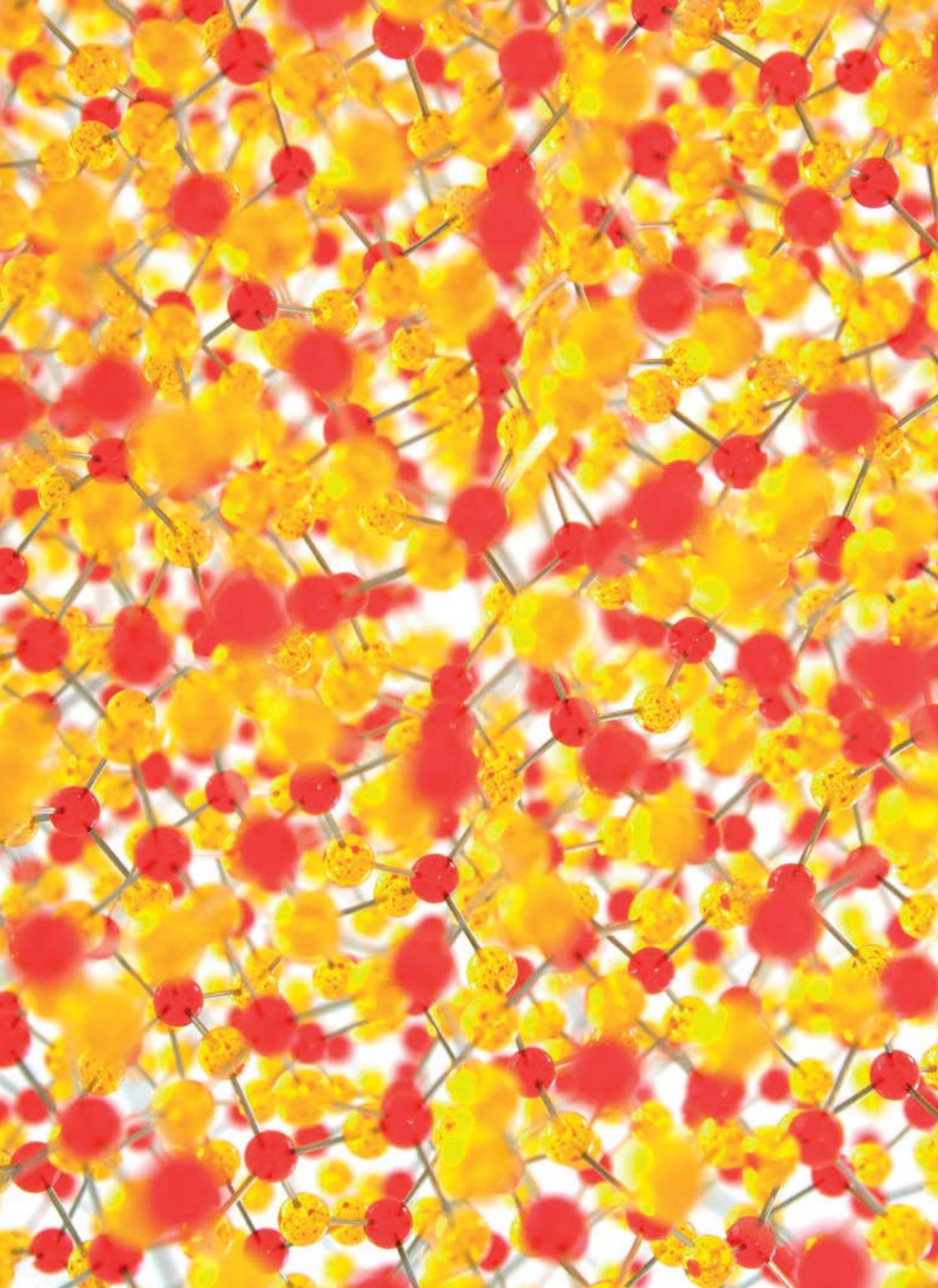
Na área clínica, o desafio está em reduzir os custos, investindo em sequências mais rápidas de pulsos eletromagnéticos e em técnicas de processamento de imagens que permitam tanto melhorar a diferenciação entre tecidos quanto obter mapas quantitativos com informações fisiológicas relevantes.

Pode-se prever que o aumento da qualidade da imagem não será o foco principal das pesquisas na área do diagnóstico médico no futuro, mas, sim, melhorias técnicas que levem à redução de custos, tempo e exposição à radiação.

Será necessário buscar não apenas imagens de maior resolução espacial e especificidade, que permitam, além de marcar o tumor, avaliar seu comportamento em graus e velocidade de oxigenação e perfusão em várias escalas, fornecendo indicadores sobre a resposta dos tecidos aos tratamentos quimioterápicos e radioterápicos; será preciso também investir no diagnóstico que empregue a menor dose e tenha a maior precisão – adquirida com maior velocidade e menor custo, com resolução e sensibilidade suficientes. Adicionalmente, é preciso que tais procedimentos sejam bem tolerados pelo paciente.

Além da maior qualidade visual, as imagens médicas deverão agregar melhor quantificação, possibilitando sua interpretação como mapas (ditos, paramétricos) que revelem as propriedades intrínsecas dos tecidos e suas propriedades biofísicas e fisiológicas. Nesse sentido, será preciso investir na criação e no desenvolvimento de biomarcadores (moléculas que indicam a atividade fisiológica normal ou patológica de um tecido) quantitativos, mais robustos e reprodutíveis, que permitam seu uso em várias modalidades de diagnóstico e tratamento, bem como sua adoção na prática clínica.

Finalmente, observa-se que as pesquisas na área médica avançam no sentido de unir diagnóstico e terapia, para fornecer um tratamento mais personalizado e adequado a cada paciente, levando à chamada medicina personalizada. Nesse cenário, será imprescindível a incorporação de maior número de físicos médicos em hospitais e clínicas, assim como nas indústrias que desenvolvem equipamentos de diagnóstico e terapia.



# Física da matéria condensada e dos materiais

*A ciência básica e aplicada presente em praticamente tudo que usamos no dia a dia*

Cerca da metade da física teórica e experimental feita hoje no planeta deriva de uma pergunta (aparentemente) muito simples e, em parte, baseada na tentativa de dar uma resposta intuitiva para fenômenos corriqueiros do dia a dia: qual a constituição e as propriedades da matéria de que é feita grande parte dos objetos de nosso cotidiano?

A busca pelas muitas respostas para essas questões levou ao desenvolvimento de novos materiais, que são empregados em equipamentos indissociáveis de nosso dia a dia: TVs, computadores, celulares, carros, aviões, utensílios domésticos...

A consequência dessa jornada intelectual trouxe muito mais do que conhecimento: gerou riqueza e bem-estar para a humanidade.

MARCOS A. PIMENTA  
*Departamento de Física,  
Universidade Federal de Minas Gerais*



Na história da humanidade, costuma-se nomear os períodos de evolução com o nome dos materiais desenvolvidos pelos humanos, como a Idade da Pedra, Idade do Bronze e a Idade do Ferro. O desenvolvimento nas técnicas de manufatura de materiais, como metais, cerâmicas e vidros, pode ser considerado como uma das formas mais antigas de engenharia e ciência aplicada. Nos últimos séculos, foram desenvolvidos novos tipos de materiais, como o aço e os plásticos, que se encontram na maioria dos produtos que lidamos em nosso dia a dia.

A intuição nos ensina que um vidro se quebra ao cair no chão, enquanto o plástico não quebra; que uma caneca de metal com café quente esquenta nossa mão, enquanto uma xícara de cerâmica esquenta muito menos; que o cobre conduz eletricidade e é opaco, enquanto o diamante é um isolante elétrico e transparente; que o ferro pode se comportar como um ímã e grudar na parede de uma geladeira, enquanto um pedaço de alumínio não tem essa propriedade.

Podemos pensar em vários outros exemplos que demonstram que diferentes tipos de materiais apresentam diferentes propriedades.

Embora usemos correntemente esse conhecimento obtido com base na observação dos fenômenos do cotidiano, o entendimento das propriedades ópticas, elétricas, térmicas, mecânicas e magnéticas presentes nesses materiais não é simples. Esse entendimento é o objetivo da física da matéria condensada, na qual os constituintes da matéria, como os átomos e moléculas, encontram-se bastante próximos e interagem mutuamente.

Por sua vez, a chamada ciência dos materiais busca usar o entendimento das propriedades fundamentais da matéria condensada para desenvolver novos tipos de materiais que tenham qualidades adequadas para cada tipo de aplicação e sejam empregados em produtos que usamos e consumimos.

A física da matéria condensada teve um enorme desenvolvimento no século passado e está presente em praticamente tudo que usamos hoje. A maioria das propriedades dos materiais só pôde ser compreendida depois do desenvolvimento da mecânica quântica (teoria que lida com os fenômenos na escala atômica e subatômica).

## ELÉTRONS E FÔNONS

Em 1911, o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) descobriu, em alguns metais, o efeito da supercondutividade, fenômeno no qual a resistência elétrica vai a zero quando o material é resfriado abaixo de determinada temperatura. Nessas condições, surge outro fenômeno muito intrigante: o material expulsa um campo magnético de seu interior.

Essa descoberta experimental deu origem a um grande avanço na física teórica, pois foi necessário o desenvolvimento de modelos nos quais os sólidos são descritos por seus elétrons e seus fônons, bem como pelas interações entre essas duas entidades quânticas. Os fônons são 'pacotes indivisíveis' (ou, na linguagem técnica, *quanta*) de vibrações atômicas nos cristais – assim como os fótons (partículas de luz) são os *quanta* das ondas eletromagnéticas.

## Magnetismo, supercondutividade e sistemas fortemente correlacionados: Da condução elétrica sem perdas a computadores ultravelozes

MUCIO CONTINENTINO

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (RJ)

A física da matéria condensada é uma área de pesquisa extremamente ativa. Além de apresentar problemas de fronteira em termos científicos, muitos dos resultados que ela obtém em curto ou médio prazo resultam em produtos que vão repercutir em nosso dia a dia.

Esse é o caso da pesquisa em materiais magnéticos, supercondutores e sistemas fortemente correlacionados em geral. Os primeiros têm uma importância decisiva nos computadores, enquanto os supercondutores permitiram o desenvolvimento dos tomógrafos, para ficarmos em apenas dois exemplos.

Nestas últimas décadas, ao menos duas descobertas vieram renovar essas tradicionais áreas de pesquisa: i) a da magnetorresistência gigante, fenômeno com grande repercussão na área de armazenamento de dados (fabricação de discos rígidos, por exemplo) e no qual a aplicação de um campo magnético externo leva a uma queda brutal da resistência elétrica; ii) a dos supercondutores de alta temperatura crítica, que vêm percorrendo um caminho de mais médio prazo no sentido de sua ampla utilização e, hoje, já podem conduzir corrente elétrica sem perda de calor por volta dos 135 graus celsius negativos.

Com a explosão na descoberta de novos supercondutores – nos quais os elétrons são dependentes uns dos outros (ou, tecnicamente, correlacionados) –, temos o desafio de compreender os mecanismos que dão origem a esse fenômeno nesses materiais.

A supercondutividade – que, em seus primórdios, acreditava-se restrita somente a metais não magnéticos – tem se revelado um fenômeno ubíquo: aparece em interfaces de materiais; em compostos com elementos essencialmente magnéticos, como o ferro; em óxidos; em materiais orgânicos; e até no metal ferro puro, quando este for suficientemente pressionado.

Portanto, está lançado o grande desafio da formulação de modelos que permitam compreender a nova dimensão desse fenômeno centenário.

A área de sistemas magnéticos teve forte desenvolvimento nas últimas décadas, inclusive com a possibilidade de obtenção dos chamados magnetos amorfos, materiais magnéticos cuja estrutura molecular é marcada pela desordem estrutural que caracteriza os vidros em geral.

As propriedades magnéticas de sistemas de baixa dimensionalidade – pontos, fios, filmes ou mesmo certos tipos de cristais (anisotrópicos) com estruturas de menor dimensão – tem sido objeto de grande interesse.

DESAFIOS DE FRONTEIRA

Sem dúvida, é na fronteira entre o magnetismo e a supercondutividade que encontramos os maiores desafios. E, provavelmente, esse é um dos campos férteis de onde surgirão novas ideias e materiais.

A descoberta de supercondutividade na vizinhança de um ponto crítico quântico – onde a temperatura de ordem antiferromagnética se torna diferente de zero por efeito de pressão – permite convencer (mesmo os mais incrédulos) de que flutuações magnéticas quânticas podem dar origem a pares de elétrons correlacionados (os chamados pares de Cooper) responsáveis pela supercondutividade. Esse é um fenômeno intrigante, pois, nos supercondutores convencionais, a força de atração que aproxima os elétrons, dando origem a estes pares de Cooper, tem origem nas excitações da rede cristalina, que são ondas elásticas sem relação com magnetismo.

Recentemente, foi demonstrada a possibilidade de se obter uma classe especial de partículas (os chamados férmions de Majorana) na forma de fenômenos emergentes em sistemas de matéria condensada.

A teoria prevê que essas partículas, por questões 'geométricas', devem aparecer nas extremidades de fios supercondutores com emparelhamento de elétrons com 'rotação intrínseca' (*spin*) apontando na mesma direção (ditos paralelos). O fenômeno é igualmente intrigante, pois, na supercondutividade, os *spins* dos elétrons que formam os pares de Cooper apontam em direções opostas (são antiparalelos).

Os majoranas – como são conhecidas essas partículas – têm propriedades ideais para se tornarem os *bits* quânticos (*q-bits*) dos futuros computadores quânticos, que prometem ser muito mais velozes do que os equipamentos atuais.

Sabemos que fazer futurologia é arriscado. No entanto, é razoável esperar que, com uma compreensão mais profunda da supercondutividade e do magnetismo, possamos dispor, em um futuro ainda que incerto, de um supercondutor a temperatura ambiente e de dispositivos que, a partir do estudo de certas propriedades dos sólidos e do comportamento exótico de partículas, tornem realidade o tão almejado computador quântico.

Uma coisa, porém, é certa para os próximos 50 anos: surpresas. Essa é uma característica fascinante da ciência básica quando bem cultivada e fomentada.

Conhecido desde a Antiguidade, o fenômeno do magnetismo – que ocorre em poucos materiais, como o ferro – também necessita da descrição quântica da matéria, que deve incluir nesse modelo a forte interação entre seus elétrons (ver ‘Magnetismo, supercondutividade e sistemas fortemente correlacionados’ nesta edição). Atualmente, os materiais supercondutores e magnéticos se encontram em vários dispositivos de nosso dia a dia, como os sistemas de imagens por ressonância magnética usados em medicina; memórias empregadas em computadores para armazenamento de informações; leitores de fitas magnéticas, entre outros.

Outro enorme avanço na física dos materiais ocorreu com a produção de materiais moles (ver ‘Matéria mole e fluidos complexos: Cristais líquidos, polímeros e coloides’ nesta edição), como plásticos, borrachas e cristais líquidos, também usados amplamente nos equipamentos de nosso cotidiano (TVs, celulares etc.). Nos materiais moles, os átomos se arranjam em geral de forma desordenada – diferentemente dos metais e de outros tipos de cristais, nos quais a estrutura atômica tem ordem e periodicidade.

A explicação das propriedades dos materiais moles tem sido possível com o desenvolvimento de modelos da física teórica que tratam de sistemas complexos, ou seja, aqueles no quais, a partir de ingredientes simples, emergem comportamentos complexos – daí o nome.

## ERA DO SILÍCIO

Talvez, o maior avanço do século passado na física da matéria condensada tenha vindo do estudo dos semicondutores (ver ‘Semicondutores, dispositivos, materiais bidimensionais e superfícies: O eletrizante e iluminado futuro das propriedades eletrônicas e fotônicas’, na próxima página), materiais em que a condutividade elétrica é intermediária entre a dos condutores, como os metais, e a dos isolantes elétricos, como os cristais transparentes (diamante, quartzo etc.).

O desenvolvimento de dispositivos à base de semicondutores propiciou a grande revolução da eletrônica e informática (internet, por exemplo).

Exemplos típicos de semicondutores são os cristais de silício e germânio. Na década de 1940, foi desenvolvido o primeiro transistor à base deste último elemento químico. Anos depois, o silício passou a ser mais amplamente usado para a fabricação desse componente eletrônico, elemento básico de dispositivos como os *chips* (ou microprocessadores), que são o ‘cérebro’ de um computador. Por isso, podemos dizer que estamos hoje na era do silício.

Outros materiais semicondutores foram estudados e desenvolvidos nos últimos anos, como os arsenetos e nitretos de gálio, propiciando o desenvolvimento de uma nova forma de fonte de luz, os chamados LEDs (diodos emissores de luz), cada vez mais presentes em diferentes tipos de aplicações e produtos.

Em um futuro breve, os LEDs deverão substituir as lâmpadas de filamento, que consomem muito mais energia.

## Matéria mole e fluidos complexos: Cristais líquidos, polímeros e coloides

**ANTONIO MARTINS FIGUEIREDO NETO**

*Grupo de Fluidos Complexos,  
Instituto de Física, Universidade de São Paulo*

**P**ode soar estranha a denominação ‘matéria mole’ para um assunto de pesquisa em física. Esse nome se origina do francês *matière molle* e foi usado pelo físico francês Pierre-Gilles de Gennes (1932-2007), ganhador do prêmio Nobel de 1991. Nessa categoria, enquadram-se, principalmente, os polímeros, cristais líquidos, coloides, as espumas, membranas e os géis. Por exibirem fluidez, são chamados de fluidos complexos.

No caso dos fluidos complexos, ações relativamente pequenas aplicadas a eles podem levar a consequências extraordinárias. Por exemplo, uma bateria de poucos volts de um telefone celular provoca modificações estruturais no cristal líquido presente na tela do aparelho, de modo que imagens coloridas sejam mostradas com grande qualidade visual e rapidez.

Outro exemplo de material que representa os fluidos complexos é o coloide magnético, também chamado ferrofluido. Trata-se de um fluido com características magnéticas, muito usado hoje como contraste tanto em exames de ressonância magnética nuclear para identificar tumores quanto no tratamento dessas patologias.

No caso dos polímeros, é difícil imaginar a vida sem eles: DVDs, garrafas PET, borrachas, embalagens, entre outros. O estudo desses materiais apresenta desafios de natureza fundamental, principalmente no que diz respeito a compreender como as características da organização molecular local acabam se estendendo por dimensões muito maiores do que a da molécula.

A pesquisa da matéria mole tem como característica a multidisciplinaridade. A compreensão

da estrutura desses materiais e a caracterização de suas propriedades exigem a colaboração entre a física, química, áreas tecnológicas e biologia. Em particular, a interface com esta última ciência abre um campo de pesquisa fascinante, auxiliando na compreensão de mecanismos biológicos identificados nas células vivas.

Historicamente, um marco importante do início da físico-química dos fluidos complexos no Brasil se deu no estudo dos cristais líquidos.

Atualmente, a físico-química dos fluidos complexos é desenvolvida em muitos estados brasileiros. No caso dos coloides magnéticos, seu estudo é mais recente, mas a sua síntese é bem difundida no Brasil, e seu uso em dispositivos tecnológicos (por exemplo, selos magnéticos) e em biomedicina é crescente.

A físico-química de polímeros no Brasil é mais antiga. Os primeiros trabalhos científicos datam da década de 1940, mas hoje diferentes

grupos de pesquisa na área de polímeros estão consolidados no país.

Atualmente, há grupos em diversos institutos e departamentos de física e química em vários estados brasileiros, tratando tanto de problemas de natureza fundamental – como os efeitos de radiação ionizante em polímeros, estrutura eletrônica, propriedades eletrônicas de polímeros conjugados – quanto da síntese de novos materiais e aplicações, como dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos poliméricos.

O futuro dessa área de pesquisa tem um aspecto de conhecimento básico, bem como um forte componente tecnológico. Um exemplo são os mostradores (*displays*) flexíveis de alto desempenho.

O aspecto mais promissor do estudo da matéria mole está em sua interface com a biologia, na qual analogias e processos biológicos poderão ser analisados quantitativamente.

## Semicondutores, dispositivos, materiais bidimensionais e superfícies: O eletrizante e iluminado futuro das propriedades eletrônicas e fotônicas

ADO JORIO

Laboratório de Nanoespectroscopia,  
Departamento de Física,  
Universidade Federal de Minas Gerais

No século passado, os materiais semicondutores (aqueles com condutividade elétrica intermediária entre isolantes e bons condutores), como o silício, ocuparam grande parcela das mentes científicas, gerando uma revolução nas áreas da eletrônica e da fotônica. Já nas últimas décadas do século, novos materiais começaram a ganhar importância, como os polímeros condutores e os materiais inorgânicos unidimensionais.

Em 2004, a publicação da esfoliação do grafite, gerando o grafeno (folha de átomos de carbono com espessura de apenas um átomo e área ilimitada), deu início à explosão dos nanomateriais bidimensionais (ou materiais 2D). Em 2010 – portanto, apenas seis

anos após sua descoberta –, esse feito valeu aos seus idealizadores, o russo-holandês Andre Geim e o russo-britânico Konstantin Novoselov, o prêmio Nobel de Física em 2010.

A superioridade dos materiais 2D, frente a outras estruturas, deve-se a dois aspectos: i) quando uma das dimensões do material atinge a escala nanométrica (da ordem do bilionésimo de metro), pequenas variações em seu tamanho ou em sua organização atômica alteram drasticamente suas propriedades, tornando o material versátil; ii) nessa escala, as interações do material com o ambiente que o rodeia – o que é feito pela superfície do material – ganham importância, dado o enorme aumento da razão su-

perfície/volume. Os materiais bidimensionais potencializam essas interações de forma suprema, por serem ‘superfície pura’.

A chegada do grafeno foi explosiva não só pelo aspecto fundamental e poderoso da bidimensionalidade, mas também por agregar todo o conhecimento gerado anteriormente. As pesquisas em materiais unidimensionais, anteriores ao grafeno, foram fortemente direcionadas aos nanotubos de carbono, que nada mais são do que folhas de grafeno enroladas em forma de tubos.

### EFICIÊNCIA MUITO SUPERIOR

A robustez mecânica, térmica e eletrônica dos nanotubos atraiu a atenção dos cientistas. Entretanto, diferentemente do foco no carbono para materiais unidimensionais, o estudo dos materiais bidimensionais logo avançou para um grande leque de outros materiais 2D, como o fosforeno; o estaneno; o germaneno; o nitreto de boro hexagonal; os dicalcogenetos de metais de transição (como o dissulfeto de molibdênio); os monocalcogenetos metálicos (como o seleneto de gálio); os isolantes topológicos (como o telureto de bismuto); e os óxidos de perovskitas.

Esse conjunto de materiais tem propriedades

eletrônicas e fotônicas diversas, cobrindo praticamente todas as funcionalidades hoje existentes nessas duas áreas tecnológicas, mas com eficiência muito superior à dos materiais à base de silício, além de novas possibilidades de aplicação.

Adicionalmente, heteroestruturas formadas pelo empilhamento dos materiais 2D podem ter funcionalidades diversas, impossíveis de serem obtidas com os sistemas tridimensionais convencionais.

Por meio de várias tecnologias inovadoras, protótipos para aplicações desses materiais já foram desenvolvidos, como sensores moleculares ou de luz; emissores de luz; filtros moleculares; condutores transparentes e flexíveis; supercondutores; dispositivos à base de spintrônica ou transporte quântico; carreadores de drogas; reparadores de tecidos, entre outros.

Nos últimos 10 anos, o número de publicações no tema vem crescendo exponencialmente. Embora os pesquisadores brasileiros venham acompanhando esse avanço – e alguns centros de pesquisa dedicados à área tenham sido criados no país –, temos um sério problema de escala – EUA e China produzem, hoje, mais de 10 vezes o número de artigos que o Brasil publica sobre o tema, representando um risco à nossa competitividade tecnológica.

Mais recentemente, foram desenvolvidos novos tipos de LEDs constituídos de materiais orgânicos, como os polímeros semicondutores. Esses dispositivos são chamados OLEDs (LEDs orgânicos) e já têm sido usados em novos modelos de TVs.

## MODELOS TEÓRICOS

A necessidade do entendimento das propriedades fundamentais dos semicondutores, metais, isolantes, supercondutores e outros materiais desencadeou grandes avanços na física teórica. Foram, assim, desenvolvidos, no século passado, vários modelos teóricos que puderam explicar fenômenos observados experimentalmente e mesmo prever vários outros.

Apesar de sabermos, desde o início do século passado, que as propriedades dos elétrons são descritas pela mecânica quântica, a aplicação dessa teoria à matéria condensada – cujos objetos de estudo contêm um número absurdamente grande de átomos – força-nos a empregar modelos aproximados, que possam ser usados na prática.

Um desses modelos, o chamado DFT (sigla, em inglês, para teoria funcional da densidade eletrônica), tem sido comumente usado para descrever as propriedades dos átomos e elétrons da matéria condensada. Mesmo sendo uma ferramenta muito útil, versátil e poderosa, essa teoria não é suficiente para explicar algumas observações experimentais.

Por isso, têm sido desenvolvidas teorias mais sofisticadas, que permitem a descrição de materiais nos quais a interação entre os elétrons é significativa e dos cha-

mados estados excitados, nos quais os elétrons são promovidos a níveis quânticos de mais alta energia.

Outros avanços teóricos surgem do estudo dos chamados sistemas fortemente correlacionados, aqueles em que a interação entre os elétrons leva a comportamentos não triviais. Nessa área, busca-se, por exemplo, a compreensão das propriedades dos materiais que apresentam supercondutividade a temperaturas consideradas altas (cerca de 135 graus celsius negativos); dos estados da matéria imunes a pequenas perturbações (ditos estados topológicos), e dos sistemas magnéticos que não se ordenam em nenhuma temperatura, conhecidos como líquidos de *spins*.

## CRISTAIS E QUASICRISTAIS

A cristalografia é um ramo da física dos materiais que estuda como os átomos se arranjam em um cristal ou em uma molécula. Ela se baseia em experiências em que feixes de raios X, de elétrons ou de outras partículas incidem sobre o material e são difratados por ele.

A cristalografia surgiu no início do século passado e permitiu a descoberta da estrutura atômica de diferentes tipos de cristais e também, por exemplo, da estrutura de dupla hélice do DNA.

Até a década de 1980, acreditava-se que um cristal correspondia a um arranjo periódico tridimensional de uma estrutura básica, a chamada célula unitária, como uma parede é formada por um arranjo periódico de tijolos. No entanto, foram des-

cobertas ligas metálicas nas quais os átomos se organizam em estruturas incompatíveis com um arranjo periódico (por exemplo, em formatos pentagonais).

Esses novos tipos de estruturas foram denominados quasicristais, e os físicos teóricos demonstraram que a periodicidade é preservada quando se considera um espaço com dimensão maior do que três.

## UNIVERSO NANOSCÓPICO

Um avanço de grande impacto na física da matéria condensada e de materiais nos últimos 30 anos veio da produção e do estudo dos nanomateriais, ou seja, materiais com tamanhos da ordem de poucos nanômetros, na casa dos bilionésimos de metro.

A possibilidade de produzir esses materiais e o desenvolvimento de técnicas para sua observação, como os microscópios de varredura e eletrônicos, deu origem a uma nova área científica: a nanociência. Por sua vez, o uso desses materiais no desenvolvimento de produtos e dispositivos deu origem à nanotecnologia.

Há duas maneiras de produzir um material nessas dimensões: i) o método ‘de cima para baixo’ (*top-down*, em inglês), no qual são feitas ‘esculturas’ nanométricas em um material macroscópico (por exemplo, nos processadores, nos quais transistores com dimensões de poucas dezenas de nanômetros são esculpido em uma placa de silício); ii) o método ‘de baixo para cima’ (*bottom-up*), em que os nanomateriais são construídos a partir de átomos que, na maioria das vezes, organizam-se espontaneamente, formando um nanomaterial. Um ótimo exemplo desse segundo método são os chamados nanotubos de carbono, que foram ‘fabricados’ (ou sintetizados) de forma controlada no início da década de 1990, por meio da organização espontânea de átomos provenientes de um gás desse elemento químico.

Os nanotubos de carbono são cilindros ocos – com diâmetro da ordem de 1 nanômetro. Com propriedades eletrônicas, térmicas e mecânicas fantásticas, eles já permitem atualmente o desenvolvimento de protótipos de produtos com esses atributos físicos.

Do ponto de vista da física teórica, os nanotubos são materiais ideais para se estudar a física dos sistemas unidimensionais, em que os elétrons ficam confinados em apenas uma direção.

Outra importante aplicação dos nanomateriais são os chamados nanocompósitos, misturas bem homogêneas de diferentes nanomateriais (como nanopartículas de prata e nanotubos) com outros materiais convencionais (plásticos, cerâmicas, cimento etc.). Essa mistura confere aos materiais convencionais novas propriedades, úteis em várias aplicações. Por exemplo, um plástico misturado com nanopartículas metálicas pode se tornar um condutor de eletricidade, mantendo sua flexibilidade; uma cola à base de um nanocompósito pode suportar temperaturas mais altas; o cimento com menos de 1% de nanotubos pode ter suas propriedades mecânicas muito aumentadas; uma cerâmica misturada com um nanomaterial pode deixar de ser quebradiça.

## EM 2D

Nos últimos 10 anos, ocorreu outro espetacular progresso na física da matéria condensada e dos materiais: a produção e o estudo dos materiais bidimensionais (2D). Esses cristais têm uma característica peculiar: sua espessura é de um ou poucos átomos.

Inaugurando essa nova área da física, o primeiro material 2D foi o grafeno, uma ‘folha’ de átomos de carbono organizados em uma estrutura hexagonal. De fato, já se sabia há muito tempo que o material usado no lápis (grafite) é formado por um empilhamento de folhas de grafeno, mas só no início deste século foi possível isolar e fazer experiências em uma folha de grafeno.

Do ponto de vista da física teórica, o grafeno é uma excelente plataforma para se testarem modelos da eletrodinâmica quântica (teoria que emprega tanto a física quântica quanto a teoria da relatividade), uma vez que os elétrons nesses materiais têm um comportamento não usual e semelhante ao da luz.

Por causa das propriedades de seus elétrons, o grafeno tem sido empregado para o desenvolvimento de circuitos eletrônicos, detectores de luz e sensores de gases e químicos – esses sensores funcionam como um nariz ou uma língua eletrônicos. Assim como os nanotubos de carbono – que nada mais são do que uma folha de grafeno enrolada na forma de um cilindro –, o grafeno tem alta resistência mecânica e condutividade térmica, podendo também ser usado para conferir essas propriedades em materiais compósitos.

Do ponto de vista da eletrônica digital, baseada em transistores, o grafeno, talvez, não venha a ser muito útil, por ser um condutor de eletricidade. No entanto, nos últimos anos, foram produzidos e estudados outros tipos de materiais 2D. Alguns são semicondutores, como o dissulfeto de molibdênio; outros são isolantes (por exemplo, o nitreto de boro). Outros materiais 2D têm propriedades supercondutoras.

Atualmente, é possível empilhar vários tipos de materiais 2D e, assim, desenvolver as chamadas heteroestruturas, formadas por camadas de espessura atômica. Isso permite tanto o estudo de propriedades físicas fundamentais (como as ópticas e eletrônicas) quanto o desenvolvimento de dispositivos menores, mais rápidos e que consomem menos energia quando comparados aos atuais, baseados principalmente no silício.

Outras áreas têm atraído a atenção dos físicos da matéria condensada, como os materiais cujas propriedades são baseadas no *spin* dos elétrons (propriedade elementar associada ao magnetismo). O estudo e as aplicações desses materiais deu origem à chamada spintrônica, área equivalente à eletrônica, mas na qual se empregam *spins* em vez de elétrons.

A optrônica é outro campo emergente no desenvolvimento de dispositivos, nos quais os elétrons são, dessa vez, substituídos por fótons (partículas de luz). Nessa área, a plataforma básica para a pesquisa são os chamados cristais fotônicos, cuja entidade elementar periódica são nanomateriais e nanoestruturas com tamanhos da ordem do comprimento de onda da luz visível (aproximadamente 500 nm).

## Novos materiais: Uma revolução intimamente ligada a melhorias para a sociedade

OSVALDO NOVAIS DE OLIVEIRA JUNIOR

Grupo de Polímeros,  
Instituto de Física de São Carlos,  
Universidade de São Paulo

A humanidade emprega materiais para uso pessoal e em instrumentos há milênios. Até um século atrás, praticamente só se utilizavam materiais de fontes naturais, como metais, madeira, tecidos. Uma revolução ocorreu nas primeiras décadas do século passado, quando a estrutura da matéria foi desvendada pela física quântica, que lida com os fenômenos nas dimensões atômicas e moleculares, e a teoria da relatividade, que trata dos conceitos de espaço, tempo e, em sua versão geral, da gravidade.

Descobriu-se que toda matéria é feita de átomos, constituídos de um núcleo, com prótons e nêutrons, e de elétrons. Identificou-se o modo como esses átomos podem levar aos diferentes estados da matéria, formando sólidos, líquidos e gases, e se combinarem em moléculas. Isso permitiu melhorar os materiais existentes na natureza, bem como sintetizar novos. Os plásticos são um exemplo corriqueiro, pois sua síntese a partir de substâncias do petróleo barateou grande número de artefatos.

Mas, talvez, as áreas mais impactadas por esse novo conhecimento tenham sido as de informática e saúde. Circuitos eletrônicos e computadores não existiriam sem os dispositivos semicondutores (materiais com condutividade elétrica entre a de um condutor e a de um isolante) projetados a partir de resultados da teoria quântica. Na saúde, destacam-se os fármacos, os métodos terapêuticos e de diagnóstico dependentes de uma diversidade de materiais cujos avanços propiciaram aumento da longevidade dos humanos. E com melhor qualidade de vida.

Nas últimas décadas do século passado, um novo marco na física de materiais se estabeleceu com a descoberta de que a matéria pode ser estudada e manipulada no nível nanoscópico, ou seja, em dimensões de 1 nanômetro (nm), que é a milionésima parte de um milímetro. Com a nanotecnologia, surgiram materiais com propriedades que permitiram fabricar dispositivos mais eficientes. Por exemplo, um telefone celular hoje tem mais memória do que computadores de grande porte do passado.

### CARACTERÍSTICAS INCRÍVEIS

Se o melhor entendimento da estrutura da matéria e a nanotecnologia já geraram desenvolvimento tecnológico no século passado maior do que todos os séculos anteriores somados, muito se pode antever para o futuro próximo. Materiais inovadores vêm sendo criados, como nanotubos de carbono e grafeno, ambos baseados em 'folhas' com espessura atômica. Veículos produzidos com alta tecnologia, como os carros de corrida, podem hoje ser fabricados com fibra de carbono e compósitos, tornando-os mais leves e resistentes a impactos.

As características dos novos materiais podem também ser incríveis. De fato, os chamados metamateriais – produzidos usando nanotecnologia – tornam objetos invisíveis ao serem revestidos com eles, tal qual em filmes de ficção. Novos materiais estão no cerne da criação de novas fontes de energia. Baterias com maior durabilidade e eficiência possibilitam o uso crescente de instrumentos portáteis. Células solares de polímeros ou de perovskita (óxido de cálcio e titânio) podem alterar radicalmente a geração de energia.

Pode-se esperar a proliferação de dispositivos eletrônicos e sensores incorporados aos itens pessoais, como vestuário, mochilas, relógios e óculos, além de outros implantados no próprio corpo humano. Essas aplicações requerem componentes eletrônicos flexíveis, o que tem levado a uma busca constante por métodos de fabricação alternativos, como no caso da impressão em 3D. A incorporação de dispositivos é ingrediente essencial para a construção de máquinas inteligentes que, em breve, poderão substituir humanos – e com vantagem – em tarefas intelectuais.

O desenvolvimento de novos materiais está, portanto, intimamente ligado à busca por melhorias para a sociedade, em todas as áreas da tecnologia. Requer pesquisa multidisciplinar e integrada, tendo a pesquisa em física de materiais posição central.

## ENORMES DESAFIOS

Um enorme desafio para a humanidade nas próximas décadas será a geração de energia limpa e renovável, que não faça uso de recursos fósseis, como petróleo, gás e carvão, que são finitos e poluentes (ver nesta publicação 'Física de plasmas').

Atualmente, as formas de geração de energia limpa ainda são menos eficientes e mais caras do que as convencionais. Novos tipos de materiais (ver 'Novos materiais' nesta edição) deverão ser desenvolvidos nas próximas décadas, de modo a aumentar a eficiência e baratear os dispositivos de geração de energia limpa. Por exemplo, os dispositivos fotovoltaicos que convertem a luz do sol em eletricidade – esses dispositivos já são usados hoje e são principalmente baseados no silício.

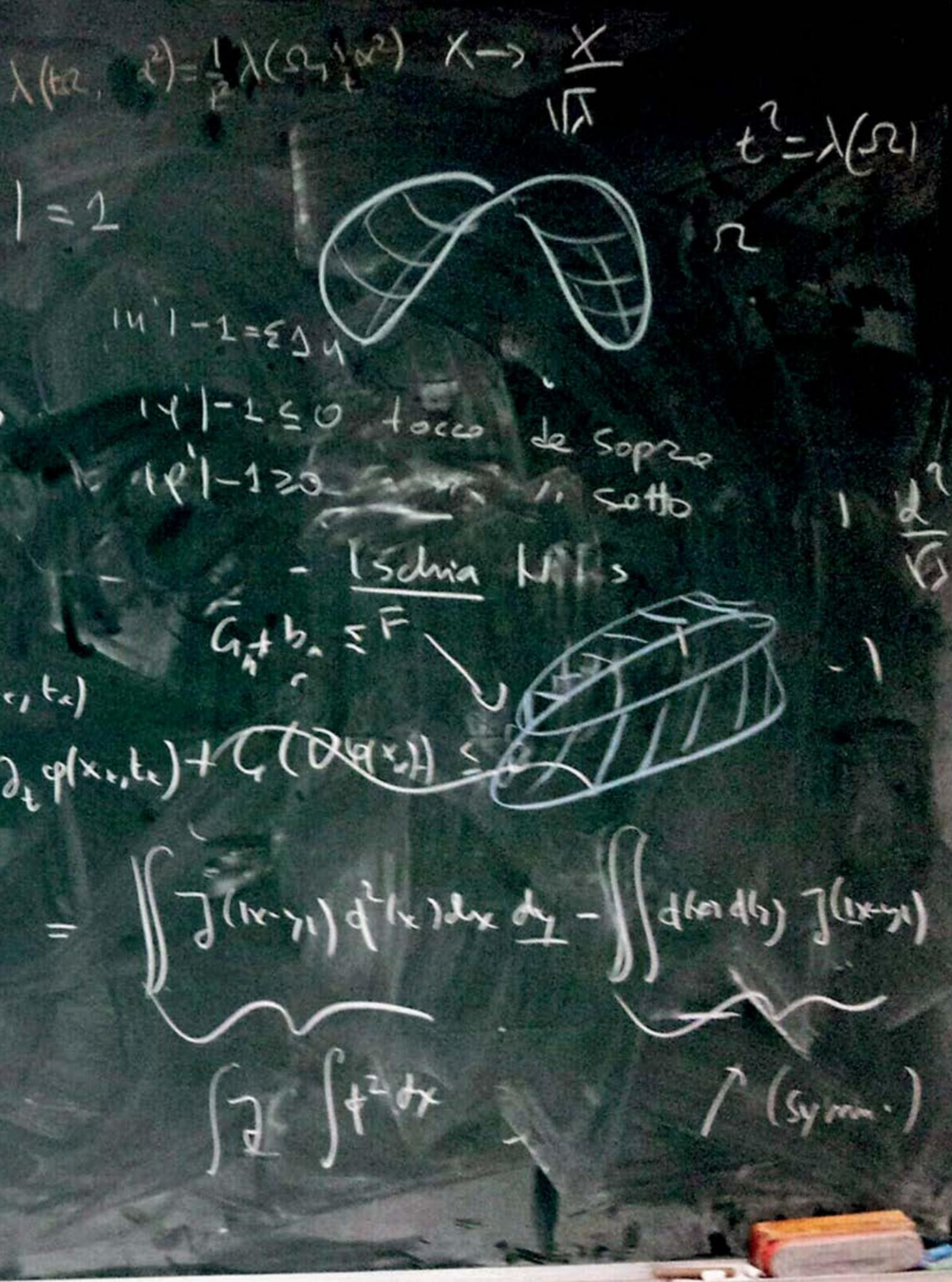
Recentemente, foram descobertos outros materiais com propriedades fotovoltaicas e mais baratos que o silício, como alguns polímeros ou cristais de perovskitas, que poderão tornar essa tecnologia viável economicamente. Serão também necessários novos materiais para desenvolver baterias que armazenem maior quantidade de energia, tornando, assim, possível o uso amplo de carros movidos a eletricidade, por exemplo.

Outro desafio será o desenvolvimento de novos tipos de dispositivos que permitam que a atual revolução da informática prossiga no mesmo ritmo de crescimento das últimas décadas. Há previsão de que, nos próximos anos, haja uma saturação no desenvolvimento da eletrônica baseada no silício. Se assim for, novos tipos de materiais – que façam o uso da nanotecnologia – deverão ser desenvolvidos, usando outros elementos químicos como os nanomateriais de carbono e diferentes tipos de moléculas.

A computação quântica é outra área emergente na física que proporcionará a realização de cálculos e resolução de problemas de forma muito mais rápida do que a atual computação binária clássica. Grandes avanços foram feitos nos últimos anos no desenvolvimento de *softwares* baseados na computação quântica, mas um enorme desafio será o desenvolvimento de plataformas físicas que permitam o uso rotineiro desse tipo de computação. Uma das possíveis soluções será a fabricação de dispositivos que façam uso de propriedades quânticas específicas dos elétrons e *spins*, e essa necessidade certamente estimulará avanços na física da matéria condensada nas próximas décadas.

Do ponto de vista da compreensão de aspectos fundamentais da matéria condensada, houve, nas últimas décadas, progressos enormes na compreensão da física dos cristais, nos quais os átomos se arranjam de forma ordenada; de materiais no estado de equilíbrio termodinâmico; e de sistemas em que as propriedades eletrônicas podem ser bem descritas por seus elétrons individuais. Os desafios para as próximas décadas serão a melhor compreensão de materiais desordenados (por exemplo, os vidros e os amorfos); materiais muito fora do equilíbrio termodinâmico; e os chamados sistemas fortemente correlacionados, aqueles em que a interação entre os elétrons leva a comportamentos que ainda não são compreendidos pelos modelos físicos atuais.

Vimos aqui alguns dos principais avanços da física da matéria condensada e dos materiais nas últimas décadas, bem como parte dos desafios reservados a esse amplo campo da pesquisa neste século. Sua história se alarga em conteúdo com o tempo, e seu futuro, certamente, reserva aquilo que vem alimentando a ciência através dos séculos: desafios e mistérios.



# Caminhos da física matemática

*Rigor matemático de uma área de fronteira com olhar para o mundo físico*

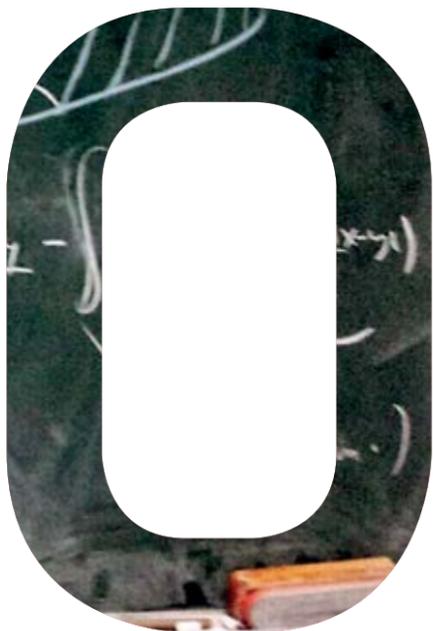
Qualquer problema físico pode, em princípio, ser estudado do ponto de vista físico-matemático, abordagem que utiliza uma ferramenta rigorosa – a matemática – para descrever e propor soluções para fenômenos naturais.

Por sua clareza de raciocínio e argumentação, a física matemática – área da física que emprega esse enfoque – oferece um arcabouço preciso para elaborar teorias e deduzir resultados a partir de premissas claras, enriquecendo, assim, as discussões físicas com conceitos, ideias e pontos de vista oriundos da matemática contemporânea.

Por essa razão, a física matemática é, por natureza, uma área de fronteira interdisciplinar.

ALBERTO SAA  
 Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica,  
 Universidade Estadual de Campinas (SP)

CREATIVE COMMONS



O que é física matemática? Das áreas convencionais da física, a física matemática talvez seja a única que não é caracterizada por seu objeto de estudo, mas, sim, pela forma com que seus estudos são conduzidos. Qualquer problema físico pode ser estudado do ponto de vista físico-matemático.

A principal distinção dessa abordagem é o rigor matemático. Não se trata, porém, de descrever apenas, de maneira matematicamente rigorosa, os fenômenos e problemas físicos em questão; trata-se, em realidade, de enriquecer as discussões físicas com conceitos, ideias e pontos de vista oriundos da matemática contemporânea.

Não é incomum também o fluxo no sentido inverso, com conceitos e ideias da física irrigando análises e problemas matemáticos. A física matemática é, essencialmente, uma área de fronteira interdisciplinar.

A física e a matemática, em suas concepções modernas, nasceram como empreendimentos conjuntos. Ambas têm no físico inglês Isaac Newton (1643-1727) uma de suas principais figuras fundadoras, e, no contexto newtoniano dos séculos 17 e 18, não

havia diferenças substanciais entre o que se entendia por uma ou por outra, sendo vários os exemplos de cientistas dessa época que contribuíram igualmente para as duas áreas.

Foi a inevitável e necessária especialização das atividades científicas, iniciada no século 19 e consolidada no século passado, que levou a diferenciação entre física e matemática ao ponto que existe hoje: as duas comunidades científicas, apesar de suas origens comuns não muito distantes, identificam-se como diferentes e independentes, com ideias, valores, motivações e modo de funcionamento distintos.

A principal diferença entre a física e a matemática é o papel do método científico, item fundamental na caracterização da primeira como uma ciência experimental.

Curiosamente, com a facilidade de acesso a recursos computacionais mais potentes, cada vez mais matemáticos, em suas atividades de pesquisa, ‘testam hipóteses’ de uma maneira que nos remete de imediato ao método científico, dando origem, inclusive, a uma subárea – ainda restrita e um tanto incipiente –, mas já chamada ‘matemática experimental’.

Não há dúvidas, contudo, de que o método científico não tem na matemática – e, talvez, realmente não deva ter – a mesma importância que tem nas ciências experimentais autênticas.

A física matemática é essencialmente uma ciência física, experimental, e, portanto, está dentro dos domínios de aplicação do método científico. ‘Física matemática’ deve ser sempre entendida como um substantivo composto, no qual matemática é um qualificador do substantivo física. Na prática, apesar de usar as mesmas ferramentas formais de um matemático, o físico matemático tem motivações e objetivos primordialmente físicos, não matemáticos.

## PROBLEMAS EM ABERTO

Pode-se ter uma ideia da natureza dos principais problemas físico-matemáticos atuais examinando-se a lista dos problemas do Prêmio do Milênio (Millennium Prize), criado pelo Instituto Clay de Matemática, com sede nos EUA, em 2000. É uma prática tradicional na matemática divulgar ‘listas’ de problemas fundamentais em aberto, oferecendo-se, muitas vezes, prêmios para aqueles que alcançarem as soluções.

No final do século 19, o rei Oscar II (1829-1907), da Suécia e Noruega, patrocinou um prêmio – que levava seu nome – para a solução de um problema eminentemente físico-matemático: o problema de  $n$ -corpos, isto é, a descrição das trajetórias de  $n$  corpos pontuais movendo-se no espaço tridimensional sob ação gravitacional mútua.

A história desse prêmio – com o qual foi agraciado o matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) – é rica em detalhes curiosos – é possível ler a respeito no artigo ‘Oscar II’s Prize Competition and the Error in Poincaré’s Memoir on the Three Body Problem’, de J. Barrow-Green Arch, publicado em *Archive for History of Exact Sciences* (v. 48, pp. 107-131, 1994).

Essa solução foi o embrião de uma nova e fecunda área, a dos sistemas dinâmicos, que teve destacado desenvolvimento no século passado, com inúmeros desdobramentos e aplicações na física e na matemática – nesse aspecto, podemos destacar a excelente escola brasileira de sistemas dinâmicos, sediada no Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), no Rio de Janeiro (RJ), que teve um de seus notáveis pesquisadores, Artur Ávila, reconhecido pelo mais importante prêmio da matemática mundial, a Medalha Fields, em 2014.

No Congresso Internacional de Matemáticos de 1900, em Paris, o célebre matemático alemão David Hilbert (1862-1943) apresentou sua lista de 23 problemas em aberto, a qual teve enorme influência no desenvolvimento da matemática desde então.

Um desses problemas (o sexto) versava sobre uma questão claramente físico-matemática: ‘o tratamento matemático dos axiomas da física’. Em termos simples, esse desafio é identificar claramente as hipóteses matemáticas (axiomas) nas quais se baseiam todas as construções e afirmações que a física aceita como verdadeiras.

Nestes mais de 100 anos, vários dos problemas originais de Hilbert foram resolvidos. A solução do sexto, no entanto, foi apenas parcial, dando origem às modernas teorias axiomáticas das probabilidades e da mecânica estatística.

## FLUIDOS E HIATO DE MASSA

Em 2000 – declarado Ano Mundial da Matemática, pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) em comemoração ao centenário dos problemas de Hilbert –, o Instituto Clay de Matemática apresentou sete problemas matemáticos em aberto, oferecendo 1 milhão de dólares pela solução de cada um deles (ver <http://www.claymath.org/millennium-problems>). Dois deles são problemas claramente físico-matemáticos: as equações de Navier-Stokes e o hiato de massa (*mass gap*) nas teorias quânticas de campos de Yang-Mills.

Derivadas no século 19, as equações de Navier-Stokes – referência ao engenheiro e matemático francês Claude Navier (1785-1836) e ao físico e matemático irlandês George Stokes (1819-1903) – regem os fenômenos dinâmicos de fluidos e são de fundamental importância em várias aplicações físicas e de engenharia – por exemplo, entender a turbulência em voos aéreos ou achar o melhor formato de uma asa de avião.

O problema consiste em, dadas as condições iniciais e genéricas de um fluido, estabelecer se as equações têm (ou não) soluções, e se estas são dotadas de certas características matemáticas (tecnicamente ditas 'suavidade').

No comportamento dos fluidos, há regimes – os ditos turbulentos, por exemplo, daí a razão do interesse em suas aplicações – nos quais pouco se sabe sobre as soluções desse conjunto de equações, sendo normalmente necessária a realização de experimentos para uma adequada descrição do movimento dos fluidos em questão.

Há indícios de que, talvez, existam soluções 'especiais' (denominadas singulares) para certas condições iniciais. Se, de fato, for provado que existem tais soluções, a conclusão será a de que as equações de Navier-Stokes não podem ser a descrição fundamental correta do fenômeno, pois tais singularidades não são observadas experimentalmente.

Como as equações de Navier-Stokes estão baseadas em princípios físicos elementares para a descrição de um fluido, estes, caso haja as tais soluções singulares, deverão necessariamente ser revistos, e o comportamento matemático das soluções será importante para a proposição de novos fundamentos físicos.

Enfim, as equações de Navier-Stokes são um exemplo bastante pedagógico de um problema físico-matemático: uma questão matemática formal (a existência de soluções suaves de certo conjunto de equações) que pode elucidar um problema físico (a dinâmica de um fluido).

O problema do hiato de massa nas teorias quânticas de campos de Yang-Mills – referência ao sino-americano Chen-Ning Yang e ao norte-americano Robert Mills (1927-1999) – diz respeito à cromodinâmica quântica, teoria física que descreve o mundo subatômico. Mais especificamente, que trata do mundo dos quarks (constituintes fundamentais das partículas nucleares, como prótons e nêutrons) e das 'forças' (interações) entre essas partículas, mediadas por partículas chamadas glúons. Em termo simples, os quarks trocam glúons, e essa troca é responsável pela interação entre eles, a chamada força forte nuclear.

O problema pode ser descrito de maneira simples: encontrar provas matemáticas rigorosas que mostrem como as equações de Yang-Mills – essência da cromodinâmica quântica – dão origem à física do núcleo atômico e de seus constituintes. Espera-se que essas provas mostrem que a massa dos glúons deve ter certo valor acima de zero – daí o termo 'hiato de massa'.

Há indícios computacionais de que a cromodinâmica quântica exhibe efetivamente esse comportamento, mas uma prova definitiva ainda é elusiva. Espera-se que os desenvolvimentos necessários para a obtenção de uma prova dessa natureza forneçam também novas ferramentas e visões que enriquecerão nosso conhecimento de outros aspectos da área, o que, em última instância, implica melhorar o conhecimento acerca dos fenômenos subnucleares.

É interessante também comentar o caso do único dos problemas do Prêmio do Milênio que foi resolvido até agora: a conjectura de Poincaré. Solucionada pelo matemático russo Grigori Perelman, pouco depois da instituição do prêmio, essa conjectura – não exatamente um problema físico-matemático – diz respeito a propriedades 'geométricas' (topológicas) de esferas em dimensões espaciais maiores que três. Essa fascinante história está relatada no livro *Perfect rigor: a genius and the mathematical breakthrough of the century*, de Masha Gessen (Houghton Mifflin Harcourt, 2009).

A solução desse problema se mostrou de uma dificuldade surpreendente. Um dos artigos de Perelman que culminaram na prova definitiva da conjectura intitula-se "The



entropy formula for the Ricci flow and its geometric applications', de onde se pode inferir que, pela citação dos termos 'entropy' (entropia) e 'Ricci flow' (fluxo de Ricci), houve alguma interação com teorias físicas modernas. Além disso, é fato que várias das teorias construídas em torno da conjectura de Poincaré foram influenciadas e sofreram influência de várias ideias e conceitos da física contemporânea.

## PERCURSO DA ÁREA NO PAÍS

A física matemática é uma área tradicional e bem estabelecida no Brasil, com grupos de pesquisa ativos presentes em várias instituições, dividindo-se, basicamente, de forma igualitária, entre departamentos e institutos de física e de matemática. Observa-se, da mesma maneira, uma divisão mais ou menos igualitária entre os pesquisadores que se consideram mais físicos ou mais matemáticos.

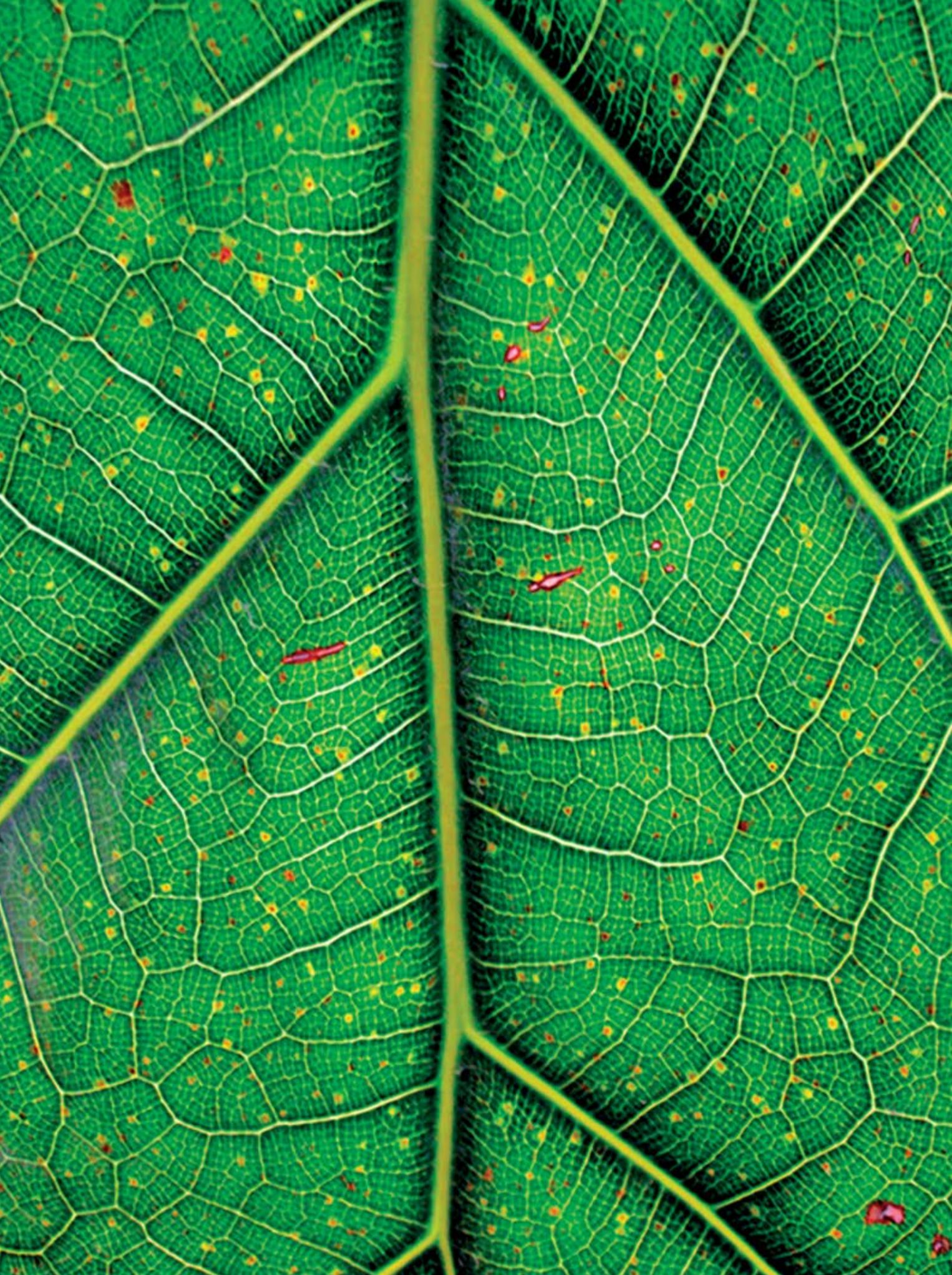
Demograficamente, a situação é semelhante à das outras áreas da física, com uma predominância de grupos e pesquisadores ainda maior nas regiões Sul e Sudeste do país. A área é razoavelmente bem inserida internacionalmente, e suas atividades estão em consonância com as desenvolvidas nos principais centros de referência internacionais.

Pela natureza de suas atividades, eminentemente teóricas, a física matemática não sofre como as outras áreas da física com agudos problemas de recursos financeiros, o que não quer dizer, de maneira alguma, que seja imune a eles. Bolsas de estudos e recursos para intercâmbio de pesquisadores são tão essenciais na física matemática como em qualquer outra área da física.

Em uma situação de escassez de recursos – como várias vezes vivenciamos no passado e que infelizmente voltamos a experimentar neste momento –, a divisão de verbas entre as várias áreas de física é sempre crítica e delicada. Nesse ponto, devemos salientar as peculiaridades da produção científica da física matemática, muitas vezes divididas entre resultados mais físicos e mais matemáticos, que exigem que qualquer tipo de análise cientométrica na área tenha que ser muito bem contextualizada, para que suas conclusões tenham alguma validade.

Comparando-se a comunidade científica brasileira com outras mais tradicionais, conclui-se que a área de física matemática no país tem um tamanho relativo adequado. Assim, o crescimento da área não é uma preocupação premente, mas sua melhoria deve ser.

É generalizada a opinião de que nossos estudantes não têm a formação adequada nos aspectos mais fundamentais da física e da matemática. O sistema universitário brasileiro cresceu muito nos últimos anos, atendendo a anseios antigos e legítimos da sociedade. É chegada a hora de aprimorarmos a qualidade de nosso sistema universitário.



# Física biológica

*A sinergia com a biologia para entender as propriedades da matéria animada*

Um mergulho no mundo vivo guiado pelas mãos da física. Assim pode ser descrita a área de física biológica, que, embora mais dirigida à pesquisa básica, tem grande potencial de inovação em aplicações médicas, farmacêuticas e biotecnológicas.

Por sua interdisciplinaridade, a lista de tópicos de estudo da física biológica – antes denominada biofísica – é longa: motores moleculares, sinalização e controle celular, desenvolvimento embrionário, sistemas neurais, evolução, ecologia, entre tantos outros. Para investigar os mecanismos que animam a matéria, essa área empresta processos e técnicas de campos de fronteira, como a biotecnologia, os sistemas complexos, a biologia sintética e a modelagem computacional.

MARCELO LOBATO MARTINS  
*Departamento de Física,  
Universidade Federal de Viçosa (MG)*



A física está em diálogo permanente com outras disciplinas, seja com a matemática ou a química, seja com a economia ou a sociologia. Esse contato é promovido pela ideia de que todos os fenômenos naturais podem ser entendidos a partir de um conjunto reduzido de leis universais. Essa concepção define a física e lhe permite transpor as fronteiras disciplinares.

Com as ciências biológicas e médicas, esse diálogo remonta aos trabalhos do físico e médico italiano Luigi Galvani (1737-1798) sobre os efeitos da corrente elétrica na contração muscular. Fruto dessa longa conversa, a física biológica – hoje, chamada assim, em vez de biofísica, para enfatizar a primazia dos métodos da física frente aos da biologia – é um campo de pesquisa extraordinariamente vasto.

Ela inclui tópicos de pesquisa como interações moleculares; estruturas supramoleculares (ou seja, arranjos e ligações entre as moléculas); motores moleculares; mecânica do ‘esqueleto’ celular (citoesqueleto); sinalização e controle celular; processos de formação de órgãos e desenvolvimento do embrião; sistemas neurais; evolução e ecologia.

Nesses estudos, a física biológica emprega várias técnicas experimentais da física, como sondas físicas e imagens, e da biotecnologia e biologia sintética (projeto e construção de novos sistemas biológicos, como bactérias e vírus). Para entender os resultados obtidos e construir um ‘mapa’ adequado do funcionamento dos sistemas biológicos, um poderoso ‘microscópio’ é usado: a modelagem matemática e a simulação computacional.

Naturalmente dirigida à pesquisa básica, a física biológica tem grande potencial de inovação em aplicações médicas, farmacêuticas e biotecnológicas. Essa nova área será, provavelmente, parte da física e da biologia, mas a maneira de pensar será a dos físicos – por isso, hoje, o termo biofísica está cada vez mais restrito a designar uma subárea da biologia.

## PITADA DE HISTÓRIA

Até 1930, a física biológica estudava fenômenos que ocorrem nas escalas de um organismo completo ou de populações biológicas. Eram poucas as noções corretas sobre como a vida cria ordem a partir do caos; como funcionam os organismos; como eles produzem e processam (computam) informações.

Nos anos seguintes, ocorre uma mudança na escala em que os fenômenos vitais eram observados. A biologia torna-se celular, e seu objeto de estudo passa a ser a estrutura e o funcionamento (metabolismo, sinalização e controle) da célula. Logo se estabelece uma base química para esses processos – fundada nas macromoléculas biológicas – e sobre a qual, após a Segunda Guerra Mundial, a biologia molecular florescerá.

Nessa transformação, as três aulas ministradas pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), em fevereiro de 1943, no Trinity College de Dublin (Irlanda), com o mote ‘O que é vida?’, representam um marco simbólico. Nelas,

Schrödinger expôs suas ideias sobre a natureza da hereditariedade e o modo como a termodinâmica (estudo do calor, trabalho e energia) se aplica aos seres vivos, indicando aos físicos que, definitivamente, havia chegado o momento de considerar problemas biológicos.

O enfoque reducionista, centrado na estrutura das biomoléculas e características de suas interações, prevaleceu até por volta de 1970. Nessa época, duas frentes promoveram avanços fundamentais no entendimento da organização da vida em escala molecular: i) os métodos da mecânica quântica (teoria que lida com os fenômenos atômicos e subatômicos); ii) técnicas experimentais baseadas na interação da matéria com diversas formas de radiação (difração de raios X, espalhamento de luz, espectroscopia, microscopia óptica) e partículas (microscopia eletrônica).

O maior exemplo do sucesso desse olhar reducionista se deu uma década depois das aulas de Schrödinger, quando, em 1953, houve a revelação da estrutura de hélice dupla da molécula de DNA e de como a informação genética presente nela é armazenada e transferida entre gerações. Essa descoberta foi feita pelo físico britânico Francis Crick (1916-2004) e pelo biólogo norte-americano James Watson.

Na década de 1970, uma nova mudança de curso acontece. Na física, seu marco simbólico é o artigo do físico norte-americano Philip Anderson, publicado em 1972, sobre os limites do reducionismo e o problema da complexidade. Em sistemas com muitas partículas, podem emergir comportamentos complexos, difíceis de prever a partir das propriedades de umas poucas partículas individuais – hoje, esses fenômenos são objeto de estudo de uma área interdisciplinar conhecida como sistemas complexos.

Na biologia, o estudo do controle metabólico e da sinalização celular, entre outros sistemas bioquímicos, revelou que as redes moleculares que operam nos seres vivos são maiores que as somas de suas partes – afinal, a biologia não é química aplicada. Nascia, então, a biologia de sistemas – com sua abordagem ampla (dita holística), quantitativa e integrativa – e com base em um imperativo: entender como as funções (fisiologia) nos diferentes níveis de organização biológica são geradas das interações entre moléculas.

Nas últimas três décadas, a convergência entre a biologia de sistemas e a física estatística acabou sendo promovida pela demanda por modelos matemáticos de múltiplas escalas (micro, meso, e macroscópica; por exemplo, molecular, celular e tecidual), com capacidade preditiva e que recorram a noções de sistemas dinâmicos, formação de padrões, redes complexas, auto-organização etc. Neste momento, estamos a testemunhar a emergência de uma nova biologia e de uma nova física biológica.

## NO BRASIL, O PORQUÊ

É um tanto inusitado que o primeiro laboratório de física biológica no Brasil tenha sido criado, em 1937, pelo médico pesquisador Carlos Chagas Filho (1910-2000), na então Universidade do Brasil (hoje, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ), para investigar a descarga elétrica natural (bioeletrogênese) observada no peixe-elétrico amazônico poraquê (*Electrophorus electricus*).

Tratava-se da biofísica celular, segundo a tradição da biologia. Contudo, esse laboratório – que, em 1945, tornou-se o Instituto de Biofísica da UFRJ – foi um marco na implantação da pesquisa científica profissional no Brasil.

Nos departamentos de física, a física biológica nasceu entre 1968 e 1971. Alguns nomes dessa fase pioneira são os físicos brasileiros Shiguo Watanabe, na Universidade de São Paulo (USP); Sérgio Mascarenhas, na USP de São Carlos; e o polonês George Bemski (1923-2005), na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Inicialmente, a pesquisa em física biológica enfrentou dificuldades de aceitação e usava equipamentos adquiridos para outros fins, como a física de sólidos. Nos 20 anos seguintes, a comunidade de física biológica cresceu lentamente. Em 1987, eram 10 grupos de pesquisa no Brasil e 53 doutores atuando na área. Exceto por um grupo em Pernambuco, esses pesquisadores atuavam no eixo Rio-São Paulo.

A partir da década de 1990, grupos oriundos de outras áreas – principalmente, da física estatística – aceleraram o crescimento e a disseminação da física biológica no país.

Nessa breve reconstrução histórica, podemos citar outros episódios relevantes, como a realização de escolas e encontros temáticos de física biológica na Universidade de Brasília, em 1995; em São Lourenço (MG), em 2006; e na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em 2010 e 2014. Além disso, em 2008, a Sociedade Brasileira de Física (SBF) criou a Comissão de Física Biológica.

A produção científica na área evoluiu rapidamente a partir da década de 1990, com grande crescimento registrado depois de 2000. Se, por exemplo, as publicações registradas no Web of Science (WoS) nas áreas de biofísica e de biologia matemática e computacional de autores brasileiros, incluindo físicos, eram, até 1985, de menos de cinco por ano, no fim da década de 1980 e na seguinte, a média passaria a ser de 10 artigos anuais. E, a partir de 2000, registram-se anualmente de 20 a 65 publicações, em periódicos nacionais e estrangeiros.

## CENÁRIO ATUAL

No ano passado, o Diretório de Grupos de Pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) registrou 56 grupos, com cerca de 370 pesquisadores doutores em física biológica, distribuídos por 15 estados brasileiros. A área cresceu, mas continua bastante concentrada geograficamente.

Dos grupos de pesquisa, 57% estão na região Sudeste; 16% no Nordeste; 12,5% no Sul e no Centro-oeste; e apenas 1,8% – um único grupo, mais ligado à física de sólidos – na região Norte. Uma consequência desse cenário é que a infraestrutura experimental também está fortemente concentrada na região Sudeste. Em razão dos grupos oriundos da física estatística (41%, reunindo cerca de 33% dos doutores da área), o perfil da física biológica se tornou ligeiramente teórico.

Enquanto os precursores sondavam as hemoproteínas (hemoglobina, por exemplo) por meio de um método baseado na análise de propriedades dos elétrons (ressonância paramagnética eletrônica), atualmente, uma diversidade de tópicos é investigada sob múltiplas técnicas. Tópicos que vão da estrutura, dinâmica e interação de biomoléculas ao planejamento de fármacos; das redes genéticas às redes neuronais e à oncologia matemática; das estruturas celulares ao desenvolvimento embrionário; da dinâmica de populações à especiação e aos ecossistemas; da coerência quântica em sistemas biológicos à nanobiotecnologia; da mecânica

celular à engenharia de tecidos e à biomimética (área que se inspira na natureza para produzir sistemas artificiais).

O impacto da física biológica brasileira pode ser avaliado por meio das citações de suas publicações. Desde 1975, no mundo, foram publicados 42 mil artigos nas várias áreas de física biológica, com um total de 953 mil citações. Nesse mesmo período, o Brasil publicou 830 artigos, com 11,7 mil citações, segundo dados da WoS.

A produção brasileira precisa crescer quantitativa e qualitativamente, pois representa 1,9% da produção mundial. Recebe, em média, 1,56 vez menos citações por artigo, e sua fração de artigos de alto impacto é 2,2 vezes menor que a do resto do mundo.

Outro aspecto importante é o grau de interdisciplinaridade dessa produção. Nos últimos três anos, 33% dos artigos brasileiros na área indexados na WoS têm coautores das biociências. Essa fração cai para 25% na subárea teórica de biologia matemática e computacional, mas aumenta para 43% na subárea de biofísica – esta última predominantemente experimental.

Entretanto, esses números indicam que os grupos estão muito centrados em suas próprias linhas de pesquisa. É preciso fortalecer as redes de colaboração entre eles e, sobretudo, com as áreas biológicas.

## PARA ONDE VAMOS?

A vida é um fenômeno emergente, histórico e organizado em múltiplas escalas entrelaçadas de tempo e espaço. Fenômenos como emergência (surgimento de novos comportamentos no sistema), não linearidade ('complexidade') e aleatoriedade ('imprevisibilidade') obrigam a biologia e a física a interagirem cada vez mais no futuro.

Na era das 'ômicas' – proteômica, genômica, metabolômica etc. –, o advento de várias técnicas experimentais de alto desempenho produziu medidas quantitativas, no nível de sistemas, para virtualmente todas as biomoléculas, bem como forneceu visões sem precedentes do funcionamento celular. Tornou-se imperativo integrar todas as facetas da biologia, o que requer novas estratégias de modelagem matemática em que múltiplas escalas sejam consideradas em uníssono.

Na construção dessa nova biologia de sistemas – quantitativa e preditiva, matemática e computacionalmente intensiva –, a física terá papel central. Conceitos como redes complexas, estabilidade dinâmica, auto-organização, cooperatividade etc. já estão no cerne da biologia de sistemas.

Há uma profusão de problemas abertos em todos os níveis da hierarquia da vida: na estrutura e interação de proteínas, ácidos nucleicos e outras biomoléculas; na automontagem e no funcionamento de estruturas supramoleculares (como o ribossomo e os motores moleculares); na atividade do citoesqueleto e resposta mecânica das células; na formação e no controle dos padrões do desenvolvimento embrionário; na conectividade de redes neurais e emergência de habilidades cognitivas; no comportamento social e na ecologia de comunidades.

A física deu contribuições relevantes ao entendimento de muitos desses pro-

blemas e tem desenvolvido instrumentos cruciais para investigar a complexidade em todos os níveis. Porém, nenhuma disciplina isolada poderá enfrentar com sucesso esses desafios. Para desvendar a complexidade estrutural e funcional dos sistemas biológicos, é preciso estabelecer uma sinergia entre a biologia e a física, a teoria e o experimento.

Além dos aspectos referentes à ciência básica, a física biológica tem grande potencial de aplicação tecnológica e de resolução de questões de saúde pública. Exemplos notáveis são os biomateriais para uso na medicina regenerativa, engenharia de tecidos e biomimética.

Trata-se de planejar e sintetizar, a partir de processos de automontagem, materiais multifuncionais e dinâmicos com propriedades físico-químicas análogas às dos materiais biológicos. Na biomimética, os materiais estão voltados para aplicações não biológicas e tecnologias bioinspiradas; na engenharia de tecidos, buscam-se componentes bioativos para substituir partes do corpo danificadas por doenças ou ferimentos.

Nessas aplicações, as demandas por conhecimento básico são evidentes. É preciso entender a auto-organização que permite a construção, com alta fidelidade e gasto mínimo de energia, de estruturas complexas ricas em informação. Também é necessário elucidar rotas moleculares específicas e controlar (espacial e temporalmente) a apresentação dos sinais químicos, elétricos e mecânicos que guiam as respostas biológicas (diferenciação celular, regeneração, manutenção ou destruição de tecidos determinados) ou que promovam alterações estruturais no material.

Para o Brasil, detentor de uma biodiversidade fabulosa, a física biológica é estratégica para a prospecção, caracterização físico-química e análise da atividade biológica de compostos naturais visando a aplicações terapêuticas e tecnologias biomiméticas. A área pode contribuir também para o entendimento de doenças emergentes ou negligenciadas e para o controle epidêmico dessas patologias.

Entretanto, para que a física biológica brasileira produza contribuições básicas e aplicadas de maior impacto e em maior quantidade, é preciso, primeiramente, ampliar a infraestrutura experimental da área. Laboratórios de porte médio, com equipamentos na faixa de R\$ 1 milhão, são poucos e estão concentrados em São Paulo (Universidade Estadual Paulista, Universidade Estadual de Campinas e USP), Rio de Janeiro (UFRJ e PUC), Minas Gerais (Universidade Federal de Minas Gerais e Universidade Federal de Viçosa) e Goiás (Universidade Federal de Goiás).

Mesmo nesses centros, são pouco acessíveis, à maioria dos grupos, técnicas de manipulação de moléculas e células individuais, de microscopia de super-resolução e de varredura por sonda para a visualização *in vivo* de processos biológicos, de ressonância magnética funcional para ma-

pear a atividade cerebral, por exemplo. Apenas o LNLS tem estrutura multiusuário adequada para estudos da estrutura e dinâmica de biomoléculas.

Uma forma de expandir a infraestrutura experimental da área seria a formação de centros regionais, multiusuários, com focos em problemas desafiadores e relevantes para a região, há muito proposta pela SBF.

Uma segunda iniciativa para melhorar as contribuições da física biológica do Brasil é induzir redes de colaboração entre físicos e biólogos. O conhecimento biológico é imprescindível para que proteínas, células, tumores ou organismos específicos, em lugar de objetos genéricos, sejam considerados, ou para guiar a pesquisa em biomimética por uma diversidade muito maior de sistemas naturais, uma vez que características de interesse evoluíram de forma independente em espécies diferentes.

Essa colaboração pode facilitar a construção e a validação de modelos teóricos, inspirar aplicações específicas, estimular novas abordagens experimentais e manter os grupos orientados a problemas mais relevantes. Editais que financiassem a pesquisa física em sistemas vivos – feita de forma diferente da biologia tradicional, assegurando a participação de biocientistas, como na iniciativa PLS (sigla, em inglês, para Física dos Sistemas Vivos), da Fundação Nacional de Ciência (NSF), dos EUA – poderiam catalisar a convergência de físicos e biólogos para a solução de grandes desafios de interesse mútuo.

Por fim, seria necessário implantar programas de treinamento de estudantes e retreinamento de cientistas sêniores tanto em física quanto em biologia – programas que levem físicos a trabalhar em laboratórios de biologia e vice-versa. Tais programas contribuiriam efetivamente para mudar as duas culturas – a da física e a da biologia – e para reduzir o fosso que as separa.

É preciso atuar também no nível da graduação – ou mesmo antes dessa etapa –, adotando currículos mais flexíveis e interdisciplinares, que permitam aos estudantes aprender as linguagens e os métodos dessas duas culturas, desde o início de sua formação acadêmica.

Em resumo, a física biológica no Brasil avançou muito desde sua fundação, mas o caminho para alcançar proeminência internacional é longo. Daqui a 50 anos, outros irão avaliar aonde chegamos e o trabalho das gerações que sucederam os pioneiros.



# CALEIDOSCÓPIO

MANUTENÇÃO DE RECURSOS É ESSENCIAL PARA FAZER O PAÍS CONTINUAR A CRESCER APÓS A CRISE

# Financiamento da ciência no Brasil: o caso da física

*Baixos orçamentos e possível estagnação de bolsas comprometem C&T nacionais*

ADALBERTO FAZZIO

*Instituto de Física, Universidade de São Paulo e Centro de Ciências, Naturais e Humanas, Universidade Federal do ABC (SP)*

**A**tividade acadêmica de maneira institucionalizada iniciou-se tardiamente no Brasil, mesmo quando comparada com a de países da América Latina. A vinda da família real portuguesa, que fugia das tropas de Napoleão, em 1808, fez do Rio de Janeiro a capital do Império. Foram criados então no Brasil os primeiros cursos superiores de engenharia e medicina.

Entretanto, o conceito de um planejamento científico inicia-se apenas na década de 1930, predominantemente, na área de saúde. Na área da física, o engenheiro, físico e matemático brasileiro Theodoro Ramos (1895-1937), professor da Escola Politécnica (SP), que já trabalhava em relatividade e física quântica, seria o responsável pela missão de busca de pesquisadores europeus para a criação da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras (FFCL) da Universidade de São Paulo (USP).

Em financiamento à pesquisa em física, o fato mais relevante foi a vinda do ítalo-ucraniano Gleb Watagin (1899-1986) em 1934, que criou o Departamento de Física da FFCL. Uma década depois de sua chegada, começa uma busca mais institucionalizada para o financiamento da ciência.

O reconhecimento de parte da sociedade da importância da atividade científica como instrumento para o desenvolvimento vem depois da produção da bomba atômica. Segundo relato do físico brasileiro Marcelo Damy (1914-2009), logo após a Segunda Guerra, foi recebido apoio financeiro da Fundação Rockefeller. Wataghin e Damy visitaram os EUA para escolher o tipo de acelerador de partículas a ser instalado na USP. A Fundação Rockefeller contribuiu então com US\$ 75 mil para montar o acelerador e trazer ao país pesquisadores estrangeiros, como o físico norte-americano Arthur Compton (1892-1962), prêmio Nobel em 1927.

## MOBILIZAÇÃO INICIAL

O início da mobilização dos cientistas ocorre efetivamente em 1948, com a criação da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC) que será a grande interlocutora da comunidade científica

com órgãos governamentais. Nessa época, ocorriam discussões sobre o desenvolvimento do Brasil na área nuclear. E, em 1949, foi criado o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), instituição de direito privado com atividades de pesquisa na área nuclear.

A necessidade de uma ação mais articulada para o planejamento da ciência já estava clara na década de 1930, mas somente em 1951 foi criado o então chamado Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), vinculado à presidência da República. O CBPF e o CNPq foram criados graças às ações pessoais do almirante e químico Álvaro Alberto da Mota e Silva (1889-1976). Também nesse ano foi criada a então chamada Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (Capes), vinculada ao Ministério da Educação (MEC), com o objetivo de formar recursos humanos com qualidade para atender às necessidades das empresas públicas e privadas.

Nas décadas de 1960 e 1970, houve a consolidação de um apoio expressivo na área da física: infraestrutura laboratorial, formação de recursos humanos, além da criação de instituições de pesquisa,

como os departamentos de Física das universidades Estadual de Campinas (Unicamp) e da Federal de Pernambuco (UFPE). Em 1964, foi criado o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDE), cujo Fundo Nacional de Desenvolvimento Técnico e Científico (Funtec) destinava-se a apoiar as áreas de ciências exatas e tecnologia.

Criado em 1969, o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) foi responsável pela consolidação de importantes laboratórios no país. Por exemplo, o acelerador Pélletron, o mais importante equipamento na área de pesquisa nuclear no país, sediado no *campus* da USP, recebeu US\$ 2 milhões em 1971. Nessa época, o FNDCT tinha em sua carteira aproximadamente 1,1% do orçamento da União.

Não podemos deixar de destacar a criação da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) em 1960 – inspiração para outros estados –, que, desde sua origem, teve garantido o repasse orçamentário definido por Lei de 0,5% do total da receita tributária do estado de São Paulo – hoje, esse valor é de 1% – e que tem contribuído para o engrandecimento da física no Brasil e, em particular, de São Paulo.

Nas décadas de 1980 e 1990, a Fapesp manteve o financiamento da pesquisa sem turbulências – o que não pode ser dito do governo federal e de outras fundações estaduais. O FNDCT, na década de 1990 chegou a ter 0,3% do orçamento da União, quando a comunidade científica viveu grave crise, sobrevivendo com os poucos recursos do CNPq e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). Entre 1997 e 2002, somente a Fapesp alocou para física mais recursos que nossa principal agência federal, o CNPq (figura 1).

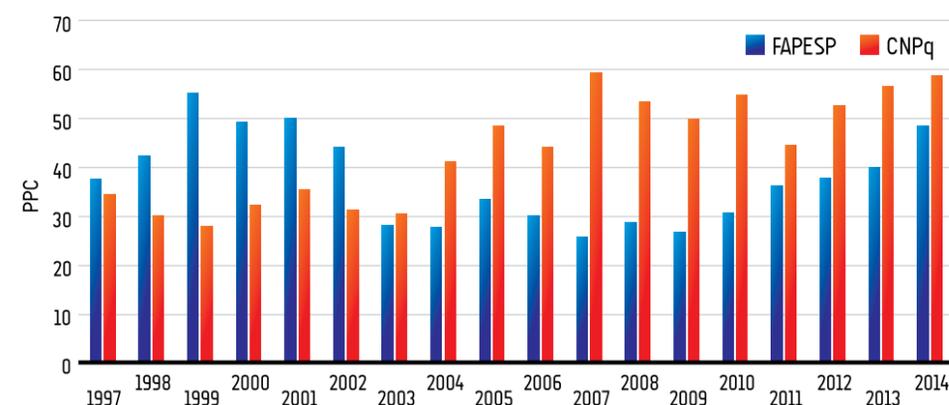


Figura 1. Investimento anual em física e astronomia da Fapesp (azul) e do CNPq (vermelho), com correção da paridade do poder de compra (PPC)

CRÉDITO: CARLOS HENRIQUE BRITO CRUZ

## IMPULSO DA LUZ SÍNCROTRON

No começo da década de 1980, os físicos se dividiram a favor e contra a construção de um acelerador de elétrons para produção de luz síncrotron em Campinas. A obra iniciou-se, finalmente, em 1987, e o acelerador foi aberto para usuários em 1997, tornando-se a seguir a Associação Brasileira de Tecnologia de Luz Síncrotron (ABTLuS), primeira organização social vinculada ao então Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT, atual MCTIC).

Hoje, expandiu-se formando o Centro Nacional de Pesquisas em Energia e Materiais (CNPEM), composto por um complexo laboratorial que é o mais bem equipado entre os institutos do MCTIC, com recursos da ordem de R\$ 90 milhões ao ano.

Está sendo construída no CNPEM a nova fonte de luz síncrotron (Sirius) – o maior projeto nacional de infraestrutura de pesquisa. Concebido como um síncrotron de quarta geração, com engenharia 100% nacional e um dos mais avançados do mundo, o Sirius abrirá enormes oportunidades para o estudo de ma-

teriais – orgânicos e inorgânicos –, com grau de detalhe sem precedentes.

A conclusão do projeto está prevista para 2018-2019, envolvendo um custo total de aproximadamente US\$ 600 milhões. É fundamental que o repasse orçamentário não seja interrompido para o cronograma ser cumprido.

## A CRIAÇÃO DOS FUNDOS SETORIAIS

O CNPq, que desde sua criação em 1951 foi o principal órgão de financiamento da pesquisa no país e o formulador da política científica, com a criação do então MCT em 1985, passou a ser um executor de programas, colocando em segundo plano seu papel de formulador de políticas.

Na área de física, como nas demais áreas da ciência, o número de mestres e doutores cresceu ano a ano, mas, em 1997, a quantidade de bolsas ofertadas diminuiu e o orçamento do CNPq no final daquela década foi de apenas R\$ 500 milhões.

O respiro para a comunidade veio por meio de uma ação muito engenhosa do governo federal: a criação, em 1998, dos fundos setoriais – atualmente são 15 –, alimentados por várias fontes de receita que compunham o FNDCT, como i) *royalties* sobre produção de petróleo e gás; ii) percentual da receita operacional líquida de empresas elétricas etc.

Essa ação foi aplaudida pela comunidade científica, que viu o retorno de investimento em pesquisa e desen-

volvimento aplicado, principalmente, na inovação tecnológica e em projetos de cooperação academia-empresa.

Vale ressaltar que no projeto de lei que criou os fundos há uma cláusula relevante relacionada à diminuição das desigualdades regionais no financiamento à pesquisa e inovação, estabelecendo-se um percentual mínimo de 30% das receitas dos fundos a serem aplicados nas regiões Norte, Centro-oeste e Nordeste. Esse tópico tem sido discutido pela SBF. Tal vinculação teve impacto importantíssimo para o desenvolvimento da física do Nordeste. Antes mais destacada na UFPE, hoje é encontrada boa produção em física em centros de ensino e pesquisa no Ceará, na Paraíba, no Rio Grande do Norte e em outros núcleos emergentes.

A figura 2 mostra o investimento nacional em pesquisa e desenvolvimento (P&D) dos setores público e privado no período de 2000 a 2013 em milhões de dólares, com a correção da paridade do poder de compra (PPC). O setor de financiamento público passa de um patamar de US\$ 8,5 bilhões em 2000 para US\$ 22,9 bilhões em 2013, com uma taxa de crescimento acentuada a partir de 2005. No setor privado, também verifica-se um aumento de US\$ 8 bilhões para US\$ 16,8 bilhões.

Se olharmos o investimento em P&D com relação ao Produto Interno Bruto (PIB), ele é de 0,54% no setor público em 2000, subindo para 0,71% em 2013. O setor privado oscila entre 0,50% a 0,57% do PIB nesse período. Com isso, o total de investimento nacional em P&D em relação ao PIB passa de 1,04% em 2000 para 1,24% em 2013.

A figura 3 apresenta a execução orçamentaria do CNPq e do FNDCT em milhões de reais em valores correntes.

## FUNDO NACIONAL E RECURSOS HUMANOS

Vale destacar o acentuado crescimento na execução do FNDCT em 2013 devido a uma política agressiva em inovação tecnológica operada pela Finep/MCTIC. Nesse cenário, é importante ver quanto cabe à física, por exemplo, nas ações do CNPq. O percentual orçamentário da área de física em relação ao total orçamentário do CNPq foi, nas últimas décadas, de aproximadamente 4%, variando entre 4,8% e 3,35%. Quando comparado com as áreas de exatas, é de cerca de um quarto.

As figuras 4A, 4B e 4C mostram o gasto total do CNPq em todas as áreas, ciências exatas e física, respectivamente, com relação ao auxílio à pesquisa, a bolsas no exterior e bolsas no país. Um dado preocupante é o baixo valor alocado para apoio à pesquisa. Em 2005, por meio de recursos do FNDCT, foi promovida uma ação para a recuperação da infraestrutura física e laboratorial.

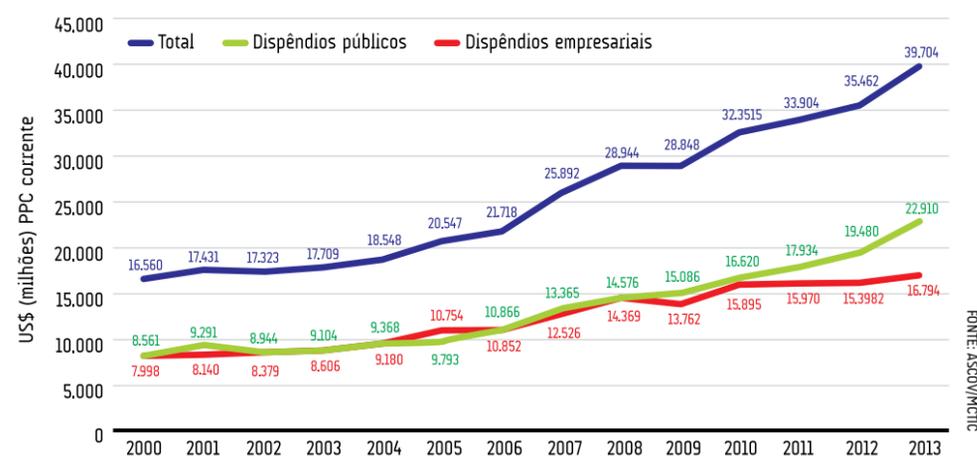


Figura 2. Gasto nacional em P&D nos setores privado (vermelho), público (verde) e total (azul)

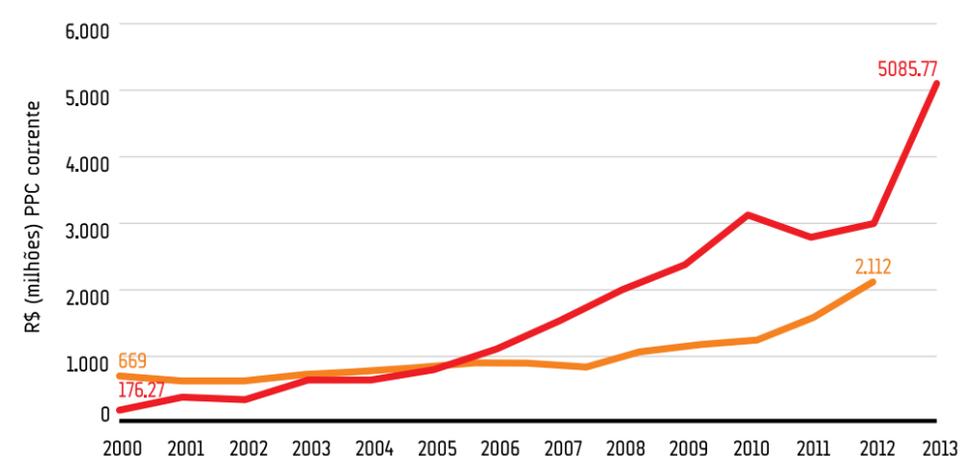


Figura 3. Execução orçamentária do CNPq (laranja) e FNDCT (vermelho) de 2000 a 2013

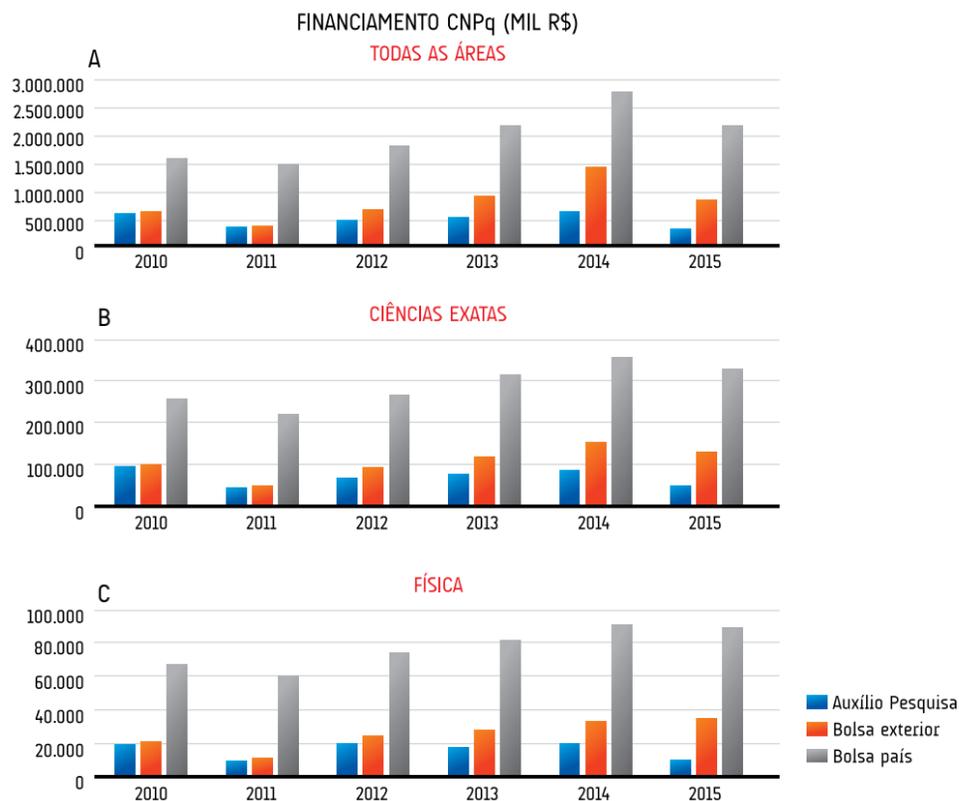


Figura 4. Financiamento do CNPq. Em A, todas as áreas. Em B, áreas de exatas. Em C, física

Fonte: CNPq

Os institutos de pesquisa do MCTIC, entre 2006 a 2010, apresentaram um crescimento significativo da infraestrutura de pesquisa, com a construção de 50 novas edificações destinadas à ampliação e modernização das instalações de P&D. As mais relacionadas à física são: laboratório de instrumentação do LNA, laboratório e sede do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (Cetene), laboratório de nanotecnologia do CBPF e ampliação da infraestrutura e das instalações experimentais do CNPEM. Esse avanço também ocorreu por meio de diversas outras ações em laboratórios de universidades.

Esses laboratórios necessitam de investimento constante para manutenção e custeio. Também não podemos deixar de lado o investimento em recursos humanos – talvez a ação mais importante. Hoje, o Brasil tem 57 programas de pós-graduação em física, e, no período de 2007 a 2013, formaram-se 1.582 doutores! Não se pode parar de qualificar pesquisadores. O CNPq tornou-se pequeno para um país que quer crescer. O financiamento ridículo para a pesquisa (R\$ 10 milhões em 2015) e uma perspectiva de estagnação no número de bolsas são fatores preocupantes para o desenvolvimento científico e tecnológico nacional.

A invenção científica está ausente do pensamento da maioria de nossos analistas e gestores econômicos. A inovação tecnológica tem como raiz a invenção que nasce nas universidades e nos institutos de pesquisa.

Entre as ciências, a física tem papel de destaque como geradora de novas tecnologias, e sabemos que indústrias baseadas na física mostram avanço significativo nos centros mais desenvolvidos. Nos EUA, estima-se que mais que um terço de seu PIB é oriundo de tecnologias baseadas na mecânica quântica.

A SBF está comemorando 50 anos de vida num ano em que o país atravessa uma grave crise econômica. A desaceleração da economia não deve ser acompanhada por cortes nos investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Devemos seguir o exemplo dos países desenvolvidos: a crise financeira provocada pela quebra do Banco Lehman-Brothers afetou fortemente a economia norte-americana; o governo não teve outra saída, fez cortes no orçamento, mas preservou os programas nas áreas de pesquisa e desenvolvimento.

A lógica foi a seguinte: quando a crise passar, o país deve estar preparado para continuar crescendo!

FORMAÇÃO DE PROFISSIONAIS DA ÁREA PRECISA DE MAIS INCENTIVOS E INICIATIVAS EFICAZES

## Professor de física neste século

*Desafios e possibilidades de uma carreira essencial para a ciência do país*

**ANDREIA GUERRA DE MORAES**

*Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (RJ)*

**Q**uando uma pessoa anuncia em uma mesa de bar que na graduação cursou física, o espanto é geral: “Física? Ai, eu não sei nada. Você deve ser um gênio!”

Será que espantos como esse explicam a falta de professores de física na educação básica? Defendemos que não. Para fazer física e ser um(a) professor(a) dessa disciplina, não é preciso ser gênio.

A física fornece-nos respostas para várias indagações – sobre o universo e a natureza – que instigam mentes. Por que, então, existem poucos professores nessa área? Sem pretendermos esgotar argumentos, vamos pontuar algumas reflexões sobre a questão.

Na última década, houve um aumento significativo da oferta de vagas para os cursos de licenciatura em física. Essa ampliação foi decorrência de uma política governamental para enfrentar o problema da falta de professores. Apesar disso, ainda é deficiente o número de docentes da área na educação básica.

As licenciaturas em física, em sua grande maioria, têm vagas ociosas. Poucos são os jovens que desejam ingressar em uma licenciatura, e muitos daqueles que escolheram o curso não tinham a carreira da docência como primeira opção.

Entretanto, a pequena procura não explica o problema da falta de professores. Pesquisas na área de ensino de física mostram ser ilusório esperar que haja maior oferta de vagas na licenciatura. Deve-se atentar para a evasão durante o exercício da profissão. Em sua dissertação de mestrado em educação para a ciência na Universidade Estadual Paulista (Unesp), Sergio Kussuda, junto com seu orientador, Roberto Nardi, apontam, a partir de resultados de pesquisas, que, mesmo considerando-se a evasão ao longo da graduação, o número de formandos conseguiria suprir a demanda por professores de física.

O grande problema, alertam os pesquisadores, é a evasão após a conclusão do curso. Dos professores de física formados, apenas uma pequena parcela permanece na educação básica. A

grande maioria dos graduados muda de área de atuação. Uma parte ingressa no magistério superior, após o término de cursos de pós-graduação, que não necessariamente são cursos da área educacional. Outros conseguem emprego fora do magistério, tanto na iniciativa privada quanto na esfera pública.

Entre as causas apontadas nas pesquisas da área de ensino para a evasão de professores da educação básica está a dificuldade encontrada pelos docentes em transpor para a escola o conhecimento apreendido ao longo de sua formação.

## PROGRAMAS DE FORMAÇÃO

Se focarmos apenas nessa causa pontual, entenderemos que é fundamental o investimento na formação de professores na graduação e na formação continuada. No primeiro quesito, existem programas, como o Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência (Pibid), construídos a partir da atuação de pesquisadores e entidades representativas junto ao governo federal.

O Pibid busca incentivar a carreira docente, estimulando o desenvolvimento de projetos educacionais por pessoas que estão cursando a licenciatura, professores de educação e formadores de professores.

Com financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), o Pibid gerou frutos, estimulando o professor da educação básica a ser protagonista do processo educacional, e colocou os licenciandos na escola, refletindo sobre aquela realidade e construindo ações nos diversos contextos escolares.

O programa, entretanto, sofre, neste ano, ameaça de cortes de verba e de extinção. A luta pela permanência do Pibid é grande, apesar de se reconhecer que não se pode esperar de uma ação isolada a resolução do problema da formação de professores.

Com relação à formação continuada dos professores, outros programas foram desenvolvidos na última década. Como resultado da negociação

de pesquisadores brasileiros e da diretoria da Sociedade Brasileira de Física (SBF), a partir de 2010, a cada ano, professores de física da educação básica se juntam a professores portugueses e africanos em uma Escola de Física no Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN), onde são desenvolvidas aulas sobre física de partículas e áreas afins, sessões experimentais e visitas a laboratórios do CERN.

Os relatos dos professores que participaram dessas escolas apontam para a importância da iniciativa.

## CARREIRA, QUALIDADE E SALÁRIO

Iniciativas como essas esbarram, entretanto, nas condições de trabalho dos docentes. Um estudo internacional feito em 2014 pela agência de consultoria *Gems Education Solutions* apontou que as condições de trabalho dos professores brasileiros são péssimas. A média salarial desses profissionais é muito baixa, levando a agência a indicar que o salário dos professores brasileiros deveria ser pelo menos três vezes maior que o atual.

Outro ponto destacado no estudo é que os docentes brasileiros são responsáveis por maior número de alunos em sala de aula: a média brasileira (32 estudantes) é muito alta se comparada à de outros países.

A esses dados, deve-se agregar a questão do plano de carreira dos professores da educação básica. Nas redes particulares, em geral, os docentes não têm plano de carreira, e muitas das redes estaduais de ensino não cumprem os planos de trabalho estabelecidos. Somam-se a essas informações resultados que apontam a insatisfação salarial e as condições desfavoráveis de trabalho como alguns dos fatores responsáveis pela evasão de professores na educação básica.

As condições de trabalho dos professores também interferem na qualidade do ensino. Especialistas no ensino de ciências, as pesquisadoras do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Flavia Rezende e Fernanda Ostermann – esta última também docente da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – concluíram, em suas pesquisas, que a formação individual do professor focada em conteúdos disciplinares e pedagógicos tem baixo impacto na qualificação profissional do mesmo.

Para que os(as) professores(as) desenvolvam plenamente seu trabalho, é fundamental que eles sejam produtores de conhecimento e, junto a outros docentes, desenvolvam projetos pedagógicos, pensando em seus problemas específicos.

O(a) professor(a) capaz de desenvolver um trabalho de qualidade em sala de aula é um profissional que entende seu objeto de trabalho – a escola e a sala de aula – como um pro-

blema a ser estudado. E, assim, sem reproduzir técnicas de ensino, constrói um saber específico. Porém, ele não produz conhecimento isolado de seus pares e da sociedade. Além de interagir na escola com outros professores, é fundamental que participe de congressos, leia artigos científicos e divulgue o saber que produziu.

Essas questões apontam para a importância dos eventos da área de ensino da SBF, como o Simpósio Nacional de Ensino de Física e o Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física, nos quais há divulgação e construção de saber fundamentais para a profissão docente.

Essas reflexões mostram que a SBF, representada por seus sócios da área de ensino, tem estado atenta à formação de professores. Para os próximos 50 anos, a SBF tem o desafio de lutar, enquanto sociedade civil, por melhores condições salariais e de trabalho para o professor da educação básica, assim como por programas governamentais que não considerem o professor um profissional que apenas necessita de mais conteúdos disciplinares e pedagógicos, mas que constitui um agente ativo e atento à realidade da sala de aula e de seus alunos, bem como elemento essencial para a construção da ciência no país.

# Mestrados profissionais em ensino de física

*Capacitar professores e melhorar a educação básica em um país extenso*

**MARTA FEIJÓ BARROSO**

*Instituto de Física,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Os físicos preocupam-se com a formação da nova geração de físicos – os futuros pesquisadores –, assim como com a da nova geração de engenheiros, químicos, professores e outros profissionais.

Influenciar a formação de novas gerações é fundamental; e professores de ensino médio desempenham um papel crucial nessa tarefa. São eles que, nas escolas, estimulam os adolescentes a prosseguir em carreiras de ciência e tecnologia, e formam a nova geração de cidadãos, que devem estar aptos a viver no mundo altamente científico e tecnológico que os cerca; a entender a forma como a ciência descreve o mundo; e a valorizar os conhecimentos e as formas de pensar dela decorrentes.

Os diagnósticos sobre a qualidade da educação básica no país não revelam um quadro animador. As discussões sobre quais ações são necessárias e quais são as prioritárias para melhorar esse quadro não fornecem uma resposta única. De fato, há a consciência de que a situação exige ações em múltiplas frentes.

Uma dessas frentes é fazer com que o número de professores de física no ensino médio seja satisfatório e a formação desses docentes, adequada. Os físicos participam da formação dos professores de física do ensino médio nos cursos de licenciatura. Mesmo que conhecer física não seja uma condição suficiente para a formação de um professor, com certeza ela é uma condição necessária. Ninguém ensina o que não domina.

Os esforços para consolidar a pós-graduação em física no país nas últimas décadas fizeram com que o número de doutores em física atuando em instituições de ensino superior fosse suficiente para que a Sociedade Brasileira de Física (SBF) pudesse pensar em uma ação mais incisiva, de modo a participar da luta pela melhoria da qualidade da educação básica.

## CURSOS EM REDE

Em 2013, a SBF criou o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), quando só existiam, no país, três mestrados profissionais estritamente nessa área.

Os mestrados profissionais são cursos voltados para profissionais em exercício; no caso dos focados no ensino, espera-se que o aluno seja um professor em sala de aula, e que seu trabalho de conclusão esteja relacionado à pesquisa aplicada ao ensino e à sala de aula.

Para isso, o aluno deve apresentar, associado à dissertação, o que é chamado ‘produto educacional’ – algum tipo de material didático (um texto, um vídeo, um aplicativo computacional, um experimento etc.) que sinalize que o professor deu um passo fundamental: o de ser capaz de reler os conteúdos de um curso de física e produzir algo a ser usado em sua sala de aula e que pode ser compartilhado por colegas.

Os mestrados nacionais são cursos em rede, que nucleiam novas experiências e podem dar origem a novos programas locais, em regiões onde isso não ocorreria espontaneamente. Foram concebidos como uma resposta necessária para a situação existente, de melhorar a educação básica em um país muito grande.

O MNPEF lançou a primeira chamada para constituição de polos em 2013 e realizou sua primeira seleção nesse mesmo ano. O curso iniciou-se com 21 polos em todo o país e 345 vagas. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (Capes) forneceu apoio financeiro a essa turma, que iniciou o curso no segundo período de 2013.

No ano seguinte, foi realizada nova chamada para constituição de polos e feita a segunda seleção. Passaram a ser 46 polos, com 503 vagas para a turma iniciante no segundo período de 2014. Este ano, atingiu-se o número de 63 polos e um novo grupo de turmas com 600 alunos em todo o país. Muitos alunos já concluíram o curso, com a defesa de suas dissertações.

O balanço preliminar dessa iniciativa exige a análise de seus objetivos, de sua grade curricular e de sua coordenação. O objetivo mencionado no programa é “capacitar em nível de mestrado uma fração muito grande de professores da educação básica quanto ao domínio de conteúdos de física e das técnicas atuais de ensino para aplicação em sala de aula”.

Em outras palavras, há dois componentes principais, presentes no projeto e manifestos na grade curricular, no processo de aprendizagem dos professores: avançar no seu conhecimento disciplinar

de física e atualizar-se no que se refere às metodologias e práticas de ensino.

Não se pretende corrigir eventuais deficiências da formação na licenciatura, mas sim avançar nessa formação, consolidando uma visão de mundo fornecida pela física; e isso sem a exigência do treinamento para a pesquisa característico dos mestrados acadêmicos tanto em física quanto em ensino de física, ciências ou educação.

O acompanhamento contínuo, por parte da comissão de pós-graduação da SBF, garante que esses objetivos sejam buscados de forma consistente pelos docentes do programa, em sua maioria doutores em física de instituições de todo o país.

## EFEITOS ADICIONAIS

Há dois efeitos adicionais emergindo desse projeto. O primeiro – e, provavelmente, o mais importante – resulta da exigência de apresentação, ao final do curso, de um material instrucional elaborado pelo aluno e aplicado em sala de aula. Esse material deve ser apresentado de forma destacada do corpo da dissertação, para que outros professores de física da educação básica possam utilizá-lo.

A elaboração dessas ferramentas começa a gerar um grupo de professores da educação básica capazes de produzir materiais instrucionais por si mesmos, e não apenas utilizar aqueles preparados nas universidades ou por professores mais experientes. Isso significa, caso se concretize, um salto de qualidade na formação e no desempenho das atividades dos professores da educação básica.

O segundo efeito é o esforço que os docentes desses cursos estão fazendo para modificar sua forma de apresentar os tópicos de física, usando enfoques mais conceituais, uma vez que o objetivo do curso não está relacionado à formação de pesquisadores. Isso está tendo reflexos na formação inicial dos professores, em cursos de licenciatura.

A criação pela SBF, com apoio da Capes, do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física é um fato a ser comemorado, juntamente com os 50 anos da Sociedade. Indica uma maturidade da comunidade dos físicos, manifesta em sua ação em relação à qualidade da educação básica.

APESAR DAS  
LIMITAÇÕES, REVISTAS  
GANHAM PERIODICIDADE  
E ALGUMA EXPOSIÇÃO  
INTERNACIONAL

# As publicações da SBF

*Do trabalho artesanal, caseiro  
e voluntário ao profissionalismo e à indexação*

**SILVIO SALINAS**

*Instituto de Física,  
Universidade de São Paulo*

A primeira publicação da Sociedade Brasileira de Física (SBF) foi um 'boletim informativo', que circulou na forma impressa, com regularidade quadrimestral, entre 1969 e 2004. O boletim destinava-se a registrar "informações de interesse para os professores e pesquisadores de física brasileiros", opiniões assinadas e comunicações da diretoria.

O primeiro boletim, no auge do período militar, refletia a combatividade de seus fundadores: foram publicados protestos de colegas estrangeiros contra as aposentadorias compulsórias e uma nota lamentando a recusa do então chamado Conselho Nacional de Pesquisas – mais tarde, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq – em apoiar pedido da diretoria para a produção de uma revista científica.

Em 2004, esse informativo foi reformulado, tornando-se um veículo exclusivamente eletrônico; em 2014, sofreu nova reformatação. As edições eletrônicas estão depositadas na internet, na página da SBF.

Além do boletim, as publicações da SBF incluem as revistas e os relatórios sobre o 'estado da física no Brasil'. Em sua primeira reunião, a diretoria da SBF decidiu realizar um estudo sobre a situação e as necessidades da física no Brasil, para apresentar às autoridades competentes. Vários trabalhos desse tipo – sobre aspectos de política científica, educação em ciências, formação de pessoal e financiamento à pesquisa – foram feitos e podem ser recuperados no sítio da SBF: um exemplo é a série *A física no Brasil na próxima década*, de 1980, e textos dos anos seguintes.

Os pioneiros da física moderna no Brasil publicavam no exterior – por exemplo, o italiano Gleb Wataghin (1899-1986) publicou uma 'carta' (*letter*) em *Physical Review* ainda em 1935 –, mas também faziam questão de fazê-lo no país, tanto em inglês quanto em português, aproveitando a seção de física dos *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. Houve até uma tentativa de editar uma revista brasileira de física e matemática, publicada de forma efêmera em 1946 e 1947.

Finalmente, em 1971, a diretoria da SBF conseguiu recursos para editar a *Revista Brasileira de Física*, com artigos em inglês ou português, bem como uma seção de ensino de física. Quando foi criado o 'programa setorial de publicações em ciência e tecnologia', com recursos da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), a revista passou a fazer parte do primeiro patamar de revistas científicas brasileiras.

Nos últimos anos, a revista tem sido apoiada por pequenos auxílios federais, concedidos nominalmente aos editores – este ano, os recursos tradicionais do CNPq para as revistas da SBF foram cortados pela metade!

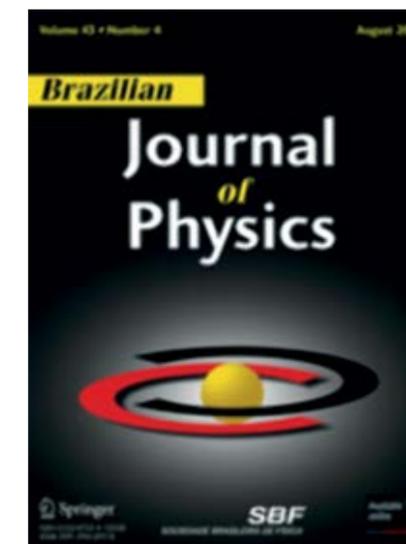
Os volumes antigos da *Revista Brasileira de Física*, publicados apenas em formato impresso, foram digitalizados por um processo de reconhecimento óptico, que ainda precisaria passar por uma revisão, mas que permitiu a disponibilização do material na página da SBF.

As publicações eletrônicas, em formato PDF, somente foram iniciadas a partir do volume 26, em 1996. Uma consulta a esses exemplares antigos é um passeio pela história da física no Brasil, em uma época em que havia pressão menor por quantidade de artigos ou pela publicação em 'revistas de impacto'.

## DE REVISTA A JOURNAL

A *Revista Brasileira de Física* teve várias fases. A 'seção de ensino' foi aos poucos sendo substituída pela *Revista Brasileira de Ensino de Física*, exclusivamente em português, destinada a um público de professores e alunos de física.

A partir de 1992, com uma edição especial sobre a 'física dos lasers', a *Revista Brasileira de Física* adotou o título atual, *Brazilian Journal of Physics*, publicando artigos exclusivamente em inglês. Além disso, o *Brazilian Journal of Physics* passou a fazer parte do Scientific Library Online (Scielo), que, aos poucos, foi se transformando no mais abrangente portal



de revistas científicas brasileiras de acesso aberto.

O *Brazilian Journal of Physics* permaneceu no Scielo até 2010, quando começou a ser produzido pela editora Springer e se tornou aberto apenas para os sócios da SBF.

Outra etapa importante do *Brazilian Journal of Physics* foi a sua indexação no Web of Science (<http://thomsonreuters.com/>), a partir de 1998. A revista ganhou, de fato, exposição internacional, mas isso se deu muito mais por conta das facilidades de comunicação eletrônica do que por seu 'parâmetro de impacto' – este último modesto em comparação com as publicações do hemisfério Norte.

Nas etapas anteriores ao acordo com a Springer, o *Brazilian Journal of Physics* foi produzido 'em casa', de forma artesanal, sob o comando do trabalho voluntário de uma pequena sucessão de editores. Os artigos submetidos, em geral nos formatos eletrônicos preferidos dos físicos, eram diagramados por uma funcionária da SBF, que também se encarregava do contato com os autores e da produção dos fotolitos para impressão.

Com o advento dos sistemas eletrônicos, foi possível projetar um sistema próprio de gerenciamento de artigos que funcionou de maneira razoável até a transferência das operações para a Springer.

O funcionamento artesanal do *Brazilian Jour-*

*nal of Physics* é um dos dilemas das nossas revistas científicas. Uma sociedade pequena como a SBF certamente encontra dificuldades para manter, de forma profissional, as suas publicações, concorrendo com editoras comerciais ou com algumas (poucas) sociedades maiores. A própria exposição internacional – principalmente, sem grande apoio da comunidade científica interna – traz vários problemas.

Algumas edições do *Brazilian Journal of Physics*, com seções especiais dedicadas a tópicos de fronteira, mesclando autores nacionais e estrangeiros, feitas com muita dedicação dos editores convidados, são um caso de sucesso. Bons artigos especialmente encomendados também têm tido êxito.

Mas ainda há um caminho longo para superar o patamar atual do fator de impacto medido pelo Web of Science. Isso requer uma ‘valorização do país’, um enorme esforço de toda a comunidade, incluindo autores, revisores e lideranças científicas.

## DE OLHO NA EDUCAÇÃO

A *Revista Brasileira de Ensino de Física* (RBEF), editada continuamente desde 1979, também passou por várias fases, sob o comando do trabalho artesanal de alguns editores.

Os volumes da primeira fase – um tanto irregulares, com material exclusivamente impresso – foram digitalizados e estão na página da SBF. A partir de 2001, a revista



foi admitida pelo Scielo e entrou em fase de publicação mais regular, aceitando também artigos em espanhol ou inglês. A produção, muito artesanal, era feita nas vizinhanças do editor, em São Carlos (SP).

A RBEF atende a um público numeroso, formado por pesquisadores, alunos de graduação e de pós-graduação, professores de física em todos os níveis de escolarização. Ela também se dedica a

divulgar metodologias e materiais para o ensino de física no país.

A revista tem contribuído para a formação de um público – de leitores, autores e também avaliadores – que cresceu muito com a ampliação do ensino superior público no país. A partir de 2009, a RBEF passou a ser indexada no *Journal of Scitation Reports*, adquirindo certa dose de exposição internacional, o que é pouco compatível com o trabalho artesanal de edição.

Neste ano, a RBEF foi incorporada pela nova equipe de produção do Scielo, que forneceu um sistema moderno de gerenciamento de artigos e pretende se responsabilizar pelos trabalhos de produção. Além de sua própria sustentabilidade, há muitas questões sobre o futuro dessa revista: a ampliação do corpo editorial, a permanência da publicação impressa, o uso da língua portuguesa frente às tendências de internacionalização.

Há duas experiências editoriais da SBF que foram infelizmente interrompidas. Houve uma tentativa de publicação da *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*: foram publicados 20 fascículos entre 1995 e 2001, que podem ser consultados na página da SBF.

Mas a experiência de maior sucesso, produto que tem sido muito procurado, é a *A Física na Escola* (FnE), espécie de suplemento semestral da RBEF. A FnE é uma revista destinada a professores do ensino médio e interessados pela qualidade do ensino de física em todos os níveis.

Na área editorial, talvez, o maior desafio da SBF seja retomar a publicação da FnE, apontando às nossas lideranças o impacto educacional de uma revista dessa natureza.

INICIATIVA DIVULGA A DISCIPLINA E IDENTIFICA JOVENS ESTUDANTES TALENTOSOS EM TODO O BRASIL

# As Olimpíadas de Física da SBF

*Instrumento de disseminação, formação e análise educacional do país*

JOSÉ DAVID M. VIANA

*Instituto de Física e Centro Internacional de Física da Matéria Condensada, Universidade de Brasília e Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia*

Entre as ações destinadas à divulgação da ciência, encontram-se, como formas tradicionais, a criação de museus de ciência e tecnologia, a redação de colunas em jornais e revistas, a realização de programas de rádio e televisão e de cursos de difusão cultural e a publicação de livros de divulgação.

As olimpíadas científicas aparecem como forma alternativa entre essas ações e, no caso da física, têm sido adotadas em vários países não só como instrumento de divulgação, mas também como forma de identificar jovens talentosos e de estimulá-los a seguir carreiras científicas e tecnológicas.

Além disso, as olimpíadas de física têm permitido fazer diagnósticos sobre o ensino-aprendizagem da área, assim como investigar e obter informações sobre os limites e as possibilidades dos estudantes em relação ao conhecimento, considerando, por exemplo, faixas etárias e níveis de escolaridade.

Atenta a esses aspectos das olimpíadas científicas, a Sociedade Brasileira de Física (SBF) criou, em 1998, a Olimpíada Brasileira de Física (OBF) e, em 2010, a Olimpíada Brasileira de Física das Escolas Públicas (OBFEP).

## UM POUCO DE HISTÓRIA

As competições acadêmicas mais antigas conhecidas são as olimpíadas de matemática, iniciadas em 1894 na Hungria. Dado o seu grande sucesso, em 1959 – quando aconteciam apenas em nível regional e/ou nacional –, foi criada a Olimpíada Internacional de Matemática (IMO, na sigla em inglês), que hoje está em sua 57ª edição.

Quanto à física, não há registro de quando e onde ocorreram as primeiras competições do tipo; provavelmente, aconteceram na Europa. Sabe-se que, na década de 1960, três professores de física do Leste Europeu – o polonês Czeslaw Scislowski, o então tcheco Rostislav Kostial e o húngaro Rudolf Kunfalvi – organizaram um concurso

de física para os melhores alunos de seus países. Esse evento teve sequência e encontra-se, hoje, na 47ª edição: é a chamada Olimpíada Internacional de Física (IPhO, na sigla em inglês). As edições dos últimos anos da IPhO têm contado com a presença de mais de 80 países e cerca de 300 estudantes.

Por iniciativa de alguns países da América Latina e de Portugal e Espanha, ocorreu em 1991, na Colômbia, a primeira edição de uma nova competição: a Olimpíada Ibero-americana de Física (OIbF). O evento ficou interrompido, por falta de recursos, até 1997, quando foi promovida a segunda edição no México. Desde então, vem acontecendo todo ano. A última OIbF (sua vigésima edição) foi realizada em setembro de 2015, na Bolívia. O Brasil foi sede da competição em 2004 – o evento ocorreu em Salvador (BA), no Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia.

No Brasil, as primeiras olimpíadas de física aconteceram em São Paulo, entre 1985 e 1987, organizadas pelo pesquisador Shigueo Watanabe, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) e então diretor-executivo da Academia de Ciências do Estado de São Paulo. Também no mesmo período, no Paraná, foram organizadas olimpíadas estaduais pelo pesquisador Vicente Dunke, da Universidade Federal do Paraná.

As competições ficaram interrompidas, por falta de apoio institucional, até 1995, quando o Centro de Divulgação Científica e Cultural do Instituto de Física de São Carlos da USP (CDCC-SP), sob a direção do pesquisador Dietrich Schiel, retomou a realização das mesmas. Em 1998, Bahia, Goiás, Pará, Pernam-

buco e Rio de Janeiro participaram de maneira experimental da olimpíada organizada pelo CDCC-SP. De forma independente, Ceará e Paraíba, desde 1993, vinham realizando olimpíadas de física restritas às cidades de Fortaleza e Campina Grande, respectivamente, com o apoio das universidades federais desses estados.

Iniciativa similar foi apoiada em 1995 pela Universidade Federal de Juiz de Fora (MG). Em 1998, a Sociedade Brasileira de Física (SBF) resolveu organizar a Olimpíada Brasileira de Física (OBF) como um programa permanente, anual, de caráter nacional, com sua primeira edição em 1999. A OBF tem ocorrido em todos os estados e conta com a inscrição, a cada ano, para a primeira fase, de cerca de 400 mil estudantes.

Considerando seu sucesso, demonstrado pelo interesse dos estudantes e pela melhoria do desempenho dos alunos em física, em 2009, atendendo convite do então ministro da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), e com o apoio desse ministério, a SBF elaborou um projeto semelhante à OBF, mas voltado para a rede pública de ensino. Assim nasceu, em 2010, a Olimpíada Brasileira de Física das Escolas Públicas (OBFEP), como projeto-piloto, aplicado na Bahia, em Goiás, São Paulo e no Piauí.

Ainda como piloto, o programa aconteceu, em 2011, além de nesses quatro estados citados, no Maranhão e em Mato Grosso. A partir de 2012, a OBFEP, com o apoio financeiro do MCTI, passou a ser um programa permanente da SBF aplicado em todo o Brasil e destinado ao ensino médio e ao último ano do ensino fundamental.

Em sua primeira edição nacional, a OBFEP teve a inscrição de mais de 1,2 milhão de estudantes.

## ORGANIZAÇÃO E EVOLUÇÃO

A OBF e a OBFEP são organizadas por duas comissões nacionais com sede na SBF, em São Paulo (SP). Seus trabalhos são promovidos em cada estado por uma coordenação estadual, cuja sede se encontra, em geral, em uma instituição de ensino superior federal ou estadual. A OBF compreende três etapas e a OBFEP, duas: cada fase inclui provas de conteúdo, conhecimento e interpretação de fe-

nômenos físicos destinadas a alunos regularmente matriculados nos dois últimos anos do ensino fundamental e nas primeira, segunda, terceira e quarta (onde houver) séries do ensino médio.

As duas primeiras fases da OBF e a primeira da OBFEP são classificatórias – os estudantes mais bem classificados são inscritos para a etapa seguinte. A última fase contém uma parte teórica e uma prática, e os alunos podem conquistar medalhas de ouro, prata e bronze e ser convidados a participar do processo de preparação para formar as equipes olímpicas brasileiras da IPhO e da OIbF. O Brasil vem participando dessas duas olimpíadas internacionais desde 2000 com equipes formadas por até cinco alunos (caso da IPhO) e quatro alunos (caso da OIbF). Tanto na IPhO quanto na OIbF, as equipes brasileiras têm se destacado, conquistando medalhas e menções honrosas: na IPhO, duas medalhas de ouro, quatro de prata, 33 de bronze e 12 menções; na OIbF, 25 de ouro, 15 de prata, 17 de bronze e cinco menções. Esses resultados colocam o Brasil, na IPhO, entre países como França, Suíça e Alemanha e, na OIbF, como um dos primeiros colocados.

A aceitação da OBF e da OBFEP pela comunidade universitária, pelas escolas de ensino médio e fundamental, por estudantes e professores tem sido grande: as competições têm sido reconhecidas como importante fonte de informação e aprendizado de física no país, colaborando para a divulgação da área nas escolas e na comunidade, bem como de outros projetos em desenvolvimento em instituições de ensino superior.

O sucesso das olimpíadas, entretanto, dependerá do apoio financeiro que se possa obter dos órgãos governamentais de financiamento ao ensino e à pesquisa.

Com a manutenção desses apoios, certamente serão alcançadas metas como: i) o desenvolvimento do pensamento científico na formação do aluno e do cidadão, o que contribuirá para um bom desempenho escolar e participação ativa na sociedade; ii) a obtenção de informações sobre os limites e possibilidades dos estudantes em relação ao conhecimento científico nas respectivas faixas etárias e níveis de escolaridade; iii) a criação de novos vínculos entre os alunos e a escola, propiciando mudanças de atitude com relação às ciências e

PARA SABER MAIS DO PROGRAMA >> Consulte um dos membros da Comissão da Olimpíada Brasileira de Física (COBF) ou da Comissão da Olimpíada Brasileira de Física das Escolas Públicas (COBFEP) citados nos portais [www.obf.org.br](http://www.obf.org.br) e [www.obfep.org.br](http://www.obfep.org.br). Outras informações também podem ser obtidas no portal da Sociedade Brasileira de Física [www.sbfisica.org.br](http://www.sbfisica.org.br).

interação direta com colegas e professores; iv) o crescimento da autoconfiança e autoestima do aluno, uma vez que desenvolve sua capacidade de entender a natureza e resolver problemas propostos; v) a aproximação entre pesquisadores universitários e professores e estudantes do ensino médio e fundamental; vi) o aprimoramento do espírito de análise e crítica dos estudantes, já que essas são características da ciência; vii) a melhoria da qualidade do ensino em ciências na educação básica; viii) a promoção de maior inclusão social por meio da difusão da ciência; ix) maior integração entre escola e comunidade.

APESAR DE  
PROGRESSOS, CARREIRA  
E PARTICIPAÇÃO DAS  
FÍSICAS NO PAÍS AINDA  
AVANÇAM LENTAMENTE

# Mulheres na física no Brasil

*Contribuição de alta relevância,  
mas, por vezes, ainda invisível*

GRASIELE BEZERRA  
MARCIA C. BARBOSA

*Instituto de Física,  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

**A** mulher sempre esteve presente no mundo do trabalho, mas, até o final do século 19, era excluída do universo profissional. Mulher trabalhava, mas não tinha carreira. Usualmente, atuava em serviços ligados ao cuidado doméstico ou em atividades que necessitassem delicadeza e cuidado. No trabalho remunerado, sempre tiveram salários menores. O mundo do conhecimento era uma prerrogativa masculina. As poucas que se aventuravam a adentrar esse universo eram consideradas párias. Os magos eram protegidos dos reis; as bruxas, queimadas.

No Brasil, a situação não foi diferente. Em 1827, a regulamentação do ensino proíbe o ensino misto, o que limitou as mulheres ao ensino fundamental, no qual aprendiam técnicas e disciplinas voltadas ao cuidado do lar e da família. Somente em 1879, por decreto do imperador D. Pedro II (1825-1891), as mulheres passam a ter acesso ao ensino superior. Em 1888, Delmira Secundina da Costa, Maria Coelho da Silva Sobrinho e Maria Fragoso graduam-se em direito, no Recife.

No início da década de 1880, algumas mulheres ingressam no curso de medicina. As primeiras a concluir essa graduação são três gaúchas: Rita Lobato Velho Lopes (1866-1954), que se formou em 1887; Ermelinda Lopes de Vasconcelos (1866-1952), formada em 1888; e Antonieta Cesar Dias (1869-1920), graduada em 1889. Rita frequentou, como as outras duas, o curso na Faculdade de Medicina do Rio de Janeiro, mas transferiu-se para a Medicina da Bahia, onde se graduou em 1887, tendo se formado em quatro anos.

A presença de mulheres nas áreas de exatas se dá duas décadas mais tarde. A primeira mulher a se formar em engenharia foi Edwiges Maria Becker, em 1917, pela Escola Politécnica do Rio de Janeiro, seguida por Carmen Portinho (1905-2001), em 1925.

## MULHERES HISTÓRICAS

Yolande Monteux (1910-1990) é a primeira mulher a se graduar em física no Brasil. A formanda de 1937 foi uma das pioneiras no estudo

de raios cósmicos, tendo trabalhado com o ítalo-ucraniano Gleb Wataghin (1899-1986).

Além de Yolande, a Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo (USP) forma, de 1937 a 1944, outras cinco mulheres: Zillah Barreto de Mesquita, Maria Heloisa Fagundes Gomes, Maria Izabel Fagundes Gomes, Sonja Ashauer (1923-1948) e Elza Furtado Gomide (1925-2013).

Entre elas, destaca-se Sonja Ashauer, que, logo após sua formatura, em 1943, foi contratada como assistente de Wataghin, atuando na pesquisa de núcleos e partículas elementares em temperaturas muito altas. Em 1945, com uma bolsa do Conselho Britânico, parte para a Inglaterra para fazer o doutorado com o físico britânico Paul Dirac (1902-1984), considerado um orientador muito difícil. Dois anos depois, Sonja torna-se a primeira brasileira com um doutorado em física. Infelizmente, vem a falecer em 1948 – possivelmente, devido a uma pneumonia. As correspondências de seus colaboradores falando do trabalho dela demonstram que, apesar de jovem, Sonja foi um grande talento que perdemos prematuramente.

No Rio de Janeiro, a primeira mulher a se graduar em física é Elisa Frota-Pessôa. Em 1944, logo após sua formatura, torna-se docente da Faculdade Nacional de Filosofia (FNFi), da então Universidade do Brasil (hoje, Universidade Federal do Rio de Janeiro). Uma das fundadoras do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), Elisa pleiteava, já como estudante, a existência de laboratórios experimentais, os quais montou em todos os institutos em que atuou. Foi pesquisadora em instituições nacionais – UFRJ, CBPF, USP, Universidade de Brasília e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – e internacionais, como no Centro Internacional de Física Teórica, em Trieste (Itália), e no London College (Inglaterra).

Elisa não foi somente uma cientista – nunca se furto à discussão política nos tempos da ditadura. Em 1965, foi demitida e teve que sair do Brasil. Ficou, na Itália, no Instituto Nacional de Física Nuclear, até 1967, quando retornou ao país, para trabalhar na USP. Foi aposentada em 1969 pelo Ato Institucional nº 5 (AI-5). Com carreira brilhante, tornou-se pesquisadora emérita do CBPF.

Em 1945, Neusa Amato (1926-2015) torna-se bacharel e, no ano seguinte, obtém a licenciatura em física na FNFi. Em 1950, a convite do físico brasileiro César Lattes (1924-2005), vai trabalhar no recém-

-fundado CBPF. Neusa inicialmente é pesquisadora voluntária, sobrevivendo como professora em escolas de ensino médio do Rio de Janeiro. Em 1951, é contratada pelo CBPF, onde trabalha até a sua aposentadoria.

Além da colaboração com os colegas do CBPF – particularmente, Lattes e Elisa –, Neusa tem trabalhos com o grupo de Turim, na Itália. Curiosamente, o primeiro artigo publicado por pesquisadores do CBPF teve Neusa Amato (então, Neusa Margem) e Elisa Frota-Pessôa como autoras.

## BRASILEIRAS E ESTRANGEIRAS

Nas décadas de 1950 e 1960, com a expansão do sistema universitário no Brasil, algumas jovens se doutoram em física nos diferentes estados da federação. Amélia Império Hamburger (1932-2011), Yvonne Mascarenhas, Victoria Hercowitz e Alice Maciel são algumas dessas pioneiras.

Amélia gradua-se na USP, onde atuou intensamente em temas de educação e divulgação científica. Yvonne doutora-se em físico-química pela USP e atua na USP de São Carlos, predominantemente em temas de cristalografia, mas também se dedicando ao ensino e à divulgação científica.

Victoria Hercowitz doutora-se em 1969 em física nuclear teórica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), onde atua por longo período. Dedicar-se igualmente, na mesma universidade, à área de ensino de física. Alice Maciel doutora-se na UFRGS, em 1969, em física nuclear experimental. Atua na

área de correlação angular, participando do primeiro experimento nessa área no Brasil.

A essas pioneiras, agregam-se estrangeiras que se mudam para o Brasil, como a argentina Susana de Souza Barros (1929-2011), que teve um papel relevante na física, mas, sobretudo, na área de ensino de física na UFRJ.

A vida dessas precursoras é impactante não apenas pelo pioneirismo de implantar o conceito de fazer ciência em um país de tradição agrícola e escravocrata, mas também pelos obstáculos que tiveram que vencer por serem mulheres e levantarem suas vozes em um período de silenciamento político.

Um relato mais detalhado da carreira e vida de algumas delas encontra-se no livro *Mulheres na física - casos históricos, panorama e perspectiva* (São Paulo: Livraria da Física, 2016). Obviamente, outras pioneiras também ajudaram a construir essa história, e este relato não pretende ser exaustivo, mas provocador, para que mais pesquisas sobre a história da física no Brasil sejam feitas.

## AVANÇO E REPRESENTAÇÃO

A presença das mulheres na física tem se ampliado desde a primeira formanda, em 1937. Esse crescimento, no entanto, tem sido muito lento. A figura 1, por exemplo, mostra o percentual de bolsistas de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) na área de física, de 2001 a 2011. Se comparado com outras áreas, o percentual não só é muito baixo como não cresce ao longo do tem-

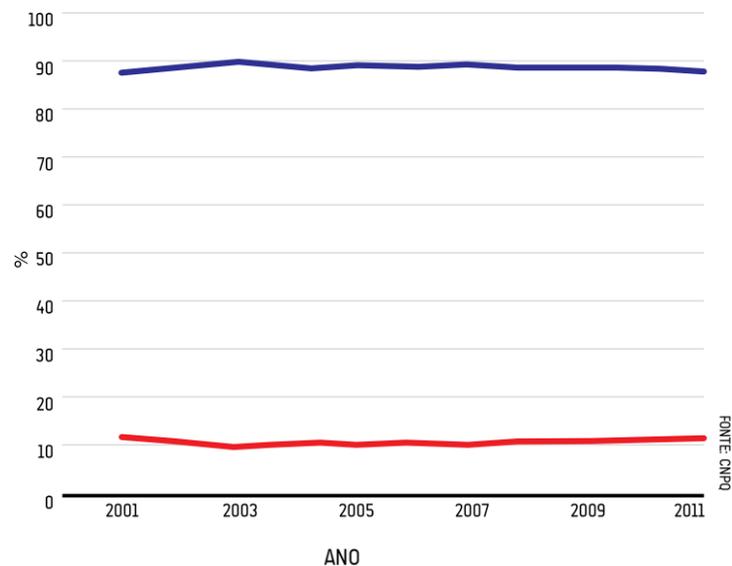


Figura 1. Percentual de homens (azul) e de mulheres (vermelho) como bolsistas de produtividade em pesquisa do CNPq, na área de física, de 2001 a 2011

po, o que sinaliza que a evolução é imperceptível nessa década.

O percentual de participação de mulheres em física não só avança devagar como se dá de maneira desproporcional nos diferentes níveis da carreira. A figura 2 mostra o percentual de mulheres bolsistas de produtividade em pesquisa do CNPq, na área de física, nos diferentes níveis. O gráfico indica a diminuição percentual da participação de mulheres à medida que se avança na carreira. Essa redução, conhecida internacionalmente como 'efeito tesoura' ou 'teto de vidro', tem se mantido inalterada em seus percentuais por mais de uma década.

A baixa representação feminina nos postos de liderança científica não é uma prerrogativa da física. A figura 3 ilustra o percentual de mulheres como membros titulares da Academia Brasileira de Ciências nas diferentes áreas. No gráfico, é possível notar que a mulher tem baixa representação, mesmo em áreas como a da saúde, na qual as mulheres graduandas já são maioria hoje.

Esse fenômeno não é uma questão de tempo, pois uma análise de dados de bolsistas de produtividade em pesquisa na área da medicina mostra que os percentuais de mulheres nos diferentes níveis em medicina, assim como em física, têm se mantido fixos por uma década.

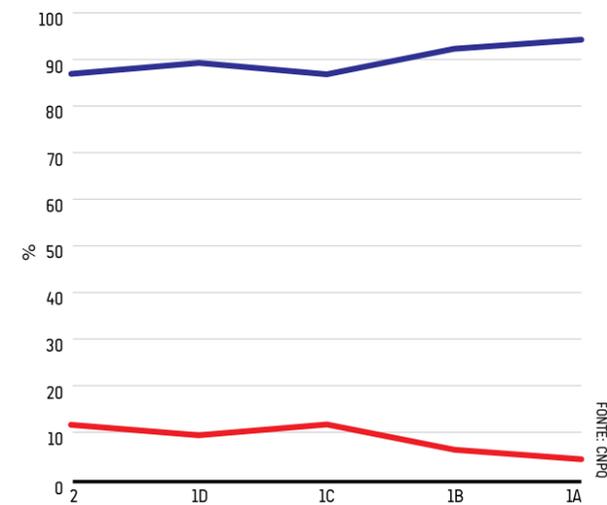


Figura 2. Percentual de homens (azul) e mulheres (vermelho) como bolsistas de produtividade em pesquisa, na área de física, nos diferentes níveis

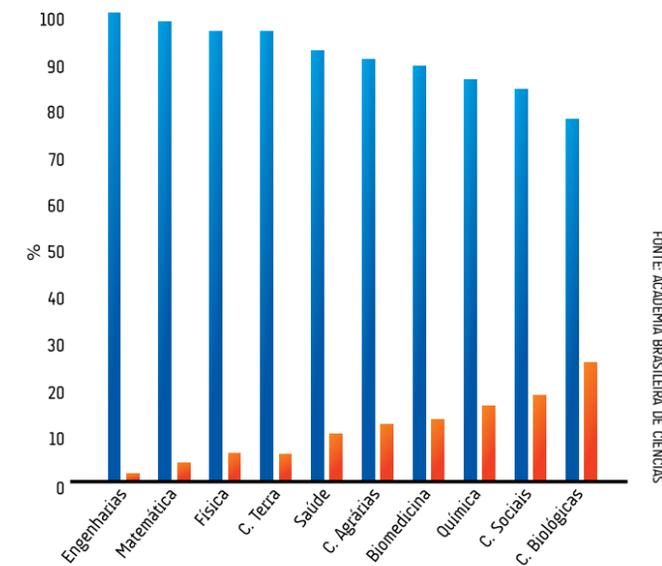


Figura 3. Percentual de homens (azul) e mulheres (vermelho) como membros titulares da Academia Brasileira de Ciências

## COMISSÃO E CONFERÊNCIA

A Sociedade Brasileira de Física (SBF) tem uma atuação importante no tema de gênero na área. O Conselho da SBF instituiu, em 2003, a Comissão de Relações de Gênero (CRG), com o objetivo de propor e estabelecer ações para resolver possíveis problemas de relações de gênero – no caso, na física.

Em 2011, essa comissão estabeleceu algumas metas, como o levantamento e a análise de dados relacionados a gênero, com base em um estudo feito pela SBF do perfil do físico no Brasil e em outras fontes de informação, como de órgãos financiadores de pesquisa e pós-graduação (CNPq, Capes e fundações de amparo à pesquisa).

O grupo realizou, em 2013, a 1ª Conferência Brasileira de Mulheres na Física, cuja segunda edição ocorreu ano passado, e foi o responsável pela publicação do livro *Mulheres na Física*. A atuação da comissão da SBF nas agências de fomento foi uma influência importante para a criação da licença-maternidade para as bolsistas de produtividade em pesquisa.

Nos primeiros meses da maternidade, muitas mulheres perdiam a bolsa por não conseguirem

manter a produção, em uma janela de tempo tão curta como a usada para a análise das bolsas. Essa ação política certamente repercutirá não apenas na ampliação da presença feminina entre bolsistas do CNPq, mas também na qualificação dessa presença, elevando o percentual de mulheres nos níveis mais altos da carreira. Este ano, o grupo, com nova composição, passa a se denominar Grupo de Trabalho de Questões de Gênero, ampliando sua atuação.

As mulheres tiveram uma atuação importante, muitas vezes invisível na construção da física do Brasil. Com a implementação de políticas que eliminem as barreiras e os estereótipos, bem como penalizem as diversas formas de assédio, a presença de mulheres irá se ampliar e elas se tornarão visíveis.

O Brasil precisa de 100% dos seus talentos para ter um desenvolvimento sustentável e socialmente justo.

# Grandes colaborações internacionais

*Brasil é protagonista em experimentos consagrados e grandes projetos*

## RONALD CINTRA SHELLARD

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)*

**N**a última semana de março deste ano, ao apresentar as conclusões de um colóquio no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), o cientista armênio Felix Aharonian – um dos mais conhecidos especialistas em raios gama de altas energias no mundo –, observou: “O projeto Lattes é essencial para estudar essa fonte!”

O tema do colóquio era a descoberta de uma fonte de raios gama no centro da nossa galáxia, relatada, poucos dias antes da palestra, na revista *Nature*, pela colaboração internacional H.E.S.S. (sigla, em inglês, para Sistema Estereoscópico para Altas Energias).

Por sua vez, Lattes é um acrônimo para *Large Array Telescope for Tracking Energetic Sources* (Grande Rede de Telescópios para a Busca de Fontes Energéticas) e também referência ao físico brasileiro César Lattes (1924-2005), um dos descobridores da partícula méson pi (ou píon), responsável por manter o núcleo atômico coeso.

Lattes é um projeto desenvolvido por cientistas de vários países. Seu objetivo é projetar, construir e operar um detector de raios gama a 5 mil metros de altitude. Sensível a energias acima de uma centena de gigaelétron-volts (GeV) – o que, para o mundo das partículas subatômicas, é um patamar elevado de energia –, o detector será capaz de monitorar continuamente uma grande região do céu do hemisfério Sul.

## O PROJETO TEVE ORIGEM NO BRASIL.

No mesmo dia da apresentação de Aharonian, a física brasileira Carola Dobrigkeit Chinelatto, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e editora científica do Observatório Pierre Auger – experimento que ocupa cerca de 3 mil km<sup>2</sup> nos pampas argentinos para o estudo da radiação cósmica –, anunciou que, em poucos dias, o documento relatando todos os detalhes do projeto de atualiza-

ção do observatório, assinado por mais de 500 cientistas, estaria disponível para a comunidade científica no repositório ArXiv (<http://arxiv.org>).

Simultaneamente, o físico argelino-francês Adlène Hicheur, pós-doutor na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), informou, aos mais de 400 cientistas do LHCb – um dos quatro grandes detectores do LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons), no Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN), em Genebra (Suíça) – a publicação de um trabalho – cuja análise de dados foi coordenada por ele – em que se examinam modos especiais de decaimento (‘desintegração’) de um tipo de partícula (denominada bóson) formada por dois constituintes elementares (quark bottom e quark charm).

Os três eventos ocorridos no mesmo dia são casos emblemáticos de uma realidade que se construiu ao longo de décadas: o protagonismo da física brasileira de altas energias no universo das colaborações internacionais.

## RAÍZES DAS COLABORAÇÕES

A história da participação de físicos brasileiros em programas internacionais tem uma de suas primeiras raízes na colaboração Brasil-Japão, construída no início da década de 1960, para explorar o fluxo de raios cósmicos com energias acima de 1 trilhão de elétrons-volts (teraelétrons-volts ou TeV), usando emulsões nucleares (chapas fotográficas especiais). Para isso, um lugar apropriado para conduzir o experimento foi identificado na montanha Chacaltaya, situada a 5,2 mil metros de altitude e a aproximadamente 20 km de La Paz (Bolívia).

Essa colaboração foi liderada, do lado brasileiro, por César Lattes, que já conhecia Chacaltaya desde 1947, quando havia exposto naquele monte emulsões no que era então uma estação meteorológica. Com essas chapas, foi confirmada a existência dos píons, detectados meses antes em um pico europeu. Lattes montaria ali, no início da década de 1950, um laboratório vinculado ao CBPF.

A colaboração Brasil-Japão, que operou até o final dos anos 1980, formou uma geração de cientistas – muitos deles ainda hoje em atividade.

No final de 1947, Lattes deixa Bristol (Reino Unido) – onde haviam sido detectados os primeiros píons no início daquele ano – e, meses depois, vai para Berkeley (EUA). Trabalhando no recém-inaugurado ciclotron, ele e o físico norte-americano Eugene Gardner (1913-1950) mostrariam que píons eram produzidos naquela máquina – então, o acelerador de partículas mais potente do mundo.

Essa descoberta mudou o panorama da área que viria a ser conhecida como física de partículas elementares: Lattes e Gardner haviam produzido artificialmente – e pela primeira vez – uma partícula até então só detectada na radiação cósmica. A partir daí, passou a ser concebível descobrir novas partículas usando aceleradores.

Foram inaugurados novos aceleradores em vários lugares dos EUA e, mais tarde, na Europa, na então União Soviética e no Japão. Gradativamente, os aceleradores foram tomando dimensões cada vez maiores, e as equipes experimentais, para construir detectores cada vez mais complexos, também foram sendo expandidas.

## MUDANÇA DE CENÁRIO

Até o início da década de 1980, a participação de físicos brasileiros em equipes experimentais em aceleradores se deu de forma isolada e não como resultado de um acordo entre países ou instituições.

Mas foi naquele período que o cenário começou a mudar. Isso ocorreu quando o norte-americano Leon Lederman, Nobel de Física de

1988, decidiu mobilizar a comunidade de físicos da América Latina, convencendo-os a participar dos experimentos que estavam sendo feitos em seu laboratório.

Lederman era o diretor do Fermilab, construído na periferia de Chicago (EUA) e que abrigava o Tévatron, que colidia prótons contra antiprótons a energias que chegavam a 1 trilhão de elétrons-volt (1TeV) – daí seu nome –, fazendo dessa máquina o então mais potente acelerador de partículas do mundo.

Quatro físicos brasileiros – Alberto Santoro, João Carlos dos Anjos e Moacyr Gomes de Souza, do CBPF, e Carlos Escobar, então na Universidade de São Paulo (USP) – aceitaram o convite para passar dois anos no Fermilab, para trabalhar no experimento conhecido pela sigla E691, que estudava a produção da partícula charm a partir da colisão de feixes energéticos de fótons (partículas de luz) contra alvos. O charm – que havia sido descoberto 10 anos antes – é um dos seis tipos de quarks hoje conhecidos.

Esses pesquisadores formaram vários estudantes e participaram também de vários desenvolvimentos tecnológicos que vieram a ter grande impacto. Por exemplo, ‘Grupo do Rio’ – como esse grupo veio a ser conhecido – participou do desenvolvimento do ACP, um arranjo de computadores pioneiro capaz de processamento de dados veloz (dito, paralelo).

Curiosamente, à época, estava em vigor a Lei da Informática, que dificultava a importação de computadores. Os ACPs – cujo projeto teve participação de tecnólogos do CBPF – não podiam ser importados; de modo que a primeira granja de

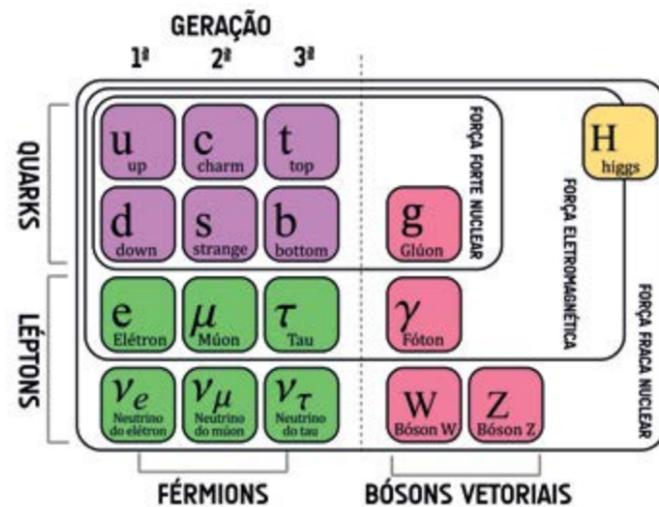
computadores, instalada no CBPF, foi importada usando mecanismos não ortodoxos.

Vale também mencionar que o grupo foi pioneiro na introdução no país da conexão internacional via internet – essencial para que pudessem participar das atividades relacionadas às colaborações experimentais.

## PARTICIPAÇÃO BRASILEIRA

A participação de brasileiros nos experimentos do Fermilab cresceu ao longo do tempo e, além do estudo do charm, ganhou mais dois temas principais de experimentos: i) usando feixes de neutrinos, para explorar as características dessa partícula neutra e elusiva; ii) na colaboração chamada DZero, um dos dois detectores do Fermilab e focado no estudo das colisões prótons-antiprótons.

Em 1995, nos dois experimentos em operação no Tévatron – o outro era o CDF (sigla, em inglês, para Detector de Colisões do Fermilab) – foi identificado o último dos quarks: o top. Essa descoberta completaria o quadro do Modelo Padrão das Partículas Elementares e Interações Fundamentais, um tipo de ‘tabela’ com todos os constituintes elementares (‘indivisíveis’) da matéria e com as partícu-



Modelo Padrão de Partículas Elementares (‘indivisíveis’) e Interações (‘forças’) Fundamentais

las responsáveis por ‘carregarem’ três das quatro interações (‘forças’) da natureza – a exceção é a gravidade.

Com a detecção do quark top – o mais pesado da família –, ficaria faltando apenas descobrir uma partícula proposta teoricamente ainda na década de 1960: o bóson de Higgs. Responsável por conferir a propriedade ‘massa’ a suas companheiras do mundo subatômico, esse bóson foi, finalmente, identificado em 2012, por dois detectores do LHC, o Atlas e CMS (sigla, em inglês, para Solenoide Compacto de Múon).

Uma das equipes brasileiras que participaram dessa importante descoberta tem suas origens naquela que fez parte do experimento DZero, no Fermilab.

## RUMO AO CERN

O sucesso da iniciativa do programa experimental do Fermilab em incorporar cientistas latino-americanos não passou despercebido da direção do CERN. Em meados de 1987, desembarcaram no Rio de Janeiro (RJ) dois cientistas portugueses, José Mariano Gago (1948-2015) e Gaspar Barreira, com a missão de convencer pesquisadores brasileiros a participarem de experimentos no CERN.

Gago – então presidente da Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica – tinha feito seu doutorado sob a supervisão do brasileiro Roberto Salmeron e havia liderado, dois anos antes, o processo de adesão de Portugal ao CERN. Por 12 anos, foi ministro de Ciência e Tecnologia de Portugal.

No início de 1988, dois grupos brasileiros juntaram-se ao experimento Delphi, um dos quatro detectores construídos para operar no LEP (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Elétrons e Pósitrons), cuja construção estava sendo finalizada. Hoje, o LHC usa esse mesmo túnel, com 27 km de extensão, cerca de 100 m abaixo da superfície, entre a fronteira da Suíça e da França.

Os brasileiros dividiam-se em dois grupos: i) um de físicos ligados ao CBPF e à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) – do qual faziam parte Maria Elena Pol e o autor

deste texto; ii) outro – com perfil inicial de engenheiros ligados à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) –, posteriormente expandido para incluir físicos, liderado por Zieli Thomé, da UFRJ. O LEP operou até o início deste século, quando foi desmontado para dar lugar ao LHC.

Hoje, há quatro grandes grupos brasileiros trabalhando no CERN, com mais de 100 cientistas associados, formando um dos principais contingentes de pesquisadores de países não membros daquele laboratório.

A dispersão desse grupo em quatro experimentos tem raízes históricas. O experimento Atlas – detector de natureza geral – é formado em grande maioria por engenheiros remanescentes do grupo original do LEP, acrescido de físicos mais jovens.

O grupo brasileiro do experimento Alice – cujo foco é o estudo de colisões de núcleos pesados – é formado por pesquisadores que originalmente trabalhavam com física nuclear de altas energias, em Brookhaven (EUA). Foi formado em torno do físico Alejandro Szanto de Toledo (1946-2015), da USP. O grupo do CMS – chefiado por Alberto Santoro, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e Sérgio Novaes, da Universidade Estadual Paulista – tem origem no DZero, do Fermilab.

Por fim, o grupo brasileiro do LHCb – detector mais voltado para o estudo da física dos quarks pesados (charm e bottom) – tem suas raízes nos experimentos do charm do Fermilab e é liderado por Ignácio Bediaga, do CBPF, e Leandro de Paula, da UFRJ.

## AUGER, GAMAS E NEUTRINOS

Em 1995, uma fração significativa dos brasileiros associados aos experimentos em aceleradores foi convidada a participar de uma reunião da Sociedade Argentina de Física, em Bariloche. Naquela reunião, o norte-americano James Cronin, Nobel de Física de 1980, apresentou o esboço de um projeto para construir um observatório – com sítios nos dois hemisférios – para estudar raios cósmicos com energias extremas (acima de  $10^{18}$  eV).

As técnicas projetadas para serem usadas nesses observatórios eram muito semelhantes às usadas na física de altas energias mais convencional, o que interessou a alguns brasileiros. Em novembro de 1995, Carlos Escobar, Armando Turtelli, ambos da Unicamp, bem como o autor deste texto, participaram de uma reunião na sede da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco), em Paris, onde representantes de 15 países formaram a colaboração cujo nome é uma homenagem ao físico francês Pierre Auger (1899-1993), grande especialista na área de raios cósmicos no século passado.

No hemisfério Sul, o local escolhido para a parte meridional do Observatório Pierre Auger (ou apenas Observatório Auger) foi a Argentina – África do Sul e Austrália eram também candidatas.

Essa escolha foi crucial para que o Brasil assumisse o compromisso de projetar e construir componentes do experimento na indústria local e de mobilizar pesquisadores tanto para a construção do observatório quanto para a posterior exploração dos dados experimentais. O Observatório Auger foi inaugurado em 2008, mas quatro anos antes já estava em operação, coletando dados.

Vale mencionar que pesquisadores brasileiros lideram uma iniciativa que busca explorar os neutrinos produzidos pelo reator nuclear de Angra dos Reis (RJ). Um dos objetivos desse experimento é testar ideias avançadas relativas ao monitoramento de salvaguardas nucleares e explorar novas tecnologias para investigar a matéria escura (partícula de natureza ainda misteriosa que preenche cerca de 25% do universo). Para se preparar para essa iniciativa, parte da equipe de brasileiros, liderada por João dos Anjos, participa de uma colaboração com o Double-Chooz, experimento de natureza semelhante na França.

E, para finalizar, vale dizer que iniciativas experimentais mais recentes com a participação de pesquisadores brasileiros têm basicamente duas direções gerais: i) medida de raios gama com energias extremamente altas, o que será feito pelo projeto CTA (sigla, em inglês, para Rede de Telescópios Cherenkov) – que conta hoje com mais de mil cientistas de vários países do mundo – e o projeto Lattes, já citado, de porte muito menor; ii) o estudo de neutrinos com o experimento DUNE (sigla, em inglês, para Experimento com Neutrinos em Subterrâneo Profundo), no Fermilab.

Mas essas são histórias a serem contadas na comemoração dos 70 anos da Sociedade Brasileira de Física.

VENCER DESAFIOS  
REQUER INVESTIMENTOS,  
CONTINUIDADE E  
REGULARIDADE DE  
AÇÕES E PROGRAMAS

## Para onde deve ir a física do Brasil?

*Mobilização permanente para assegurar futuro promissor*

**SERGIO MACHADO REZENDE**

*Departamento de Física,  
Universidade Federal de Pernambuco*

Assim como outras áreas de ciência básica, a física teve um início tardio no Brasil. Em 1940, não havia um físico brasileiro sequer com nível de doutor – na concepção em que entendemos esse título hoje –, e o ensino de física nas escolas de engenharia era feito por engenheiros.

Foram três europeus – o alemão Bernhard Gross (1905-2002), no Rio de Janeiro, bem como o ítalo-ucraniano Gleb Wataghin (1899-1986) e o italiano Giuseppe Occhialini (1907-1993), em São Paulo – que iniciaram a pesquisa em física no país e atraíram para a área jovens brasileiros.

Gross iniciou a pesquisa em materiais no Brasil e ajudou na formação de Joaquim da Costa Ribeiro (1906-1960), que, mais tarde, descobriria o efeito termoeletrônico, fenômeno no qual mudanças de estado físico causam a eletrificação de certos materiais (eletretos). Wataghin e Occhialini trabalhavam em física nuclear e de partículas elementares. Foram responsáveis por enviar brasileiros para estudar no exterior: os recifenses Mário Schenberg (1914-1990) e José Leite Lopes (1918-2006), o curitibano César Lattes (1924-2005), o carioca Jayme Tiomno (1920-2011) e o campineiro Marcelo Damy (1914-2009).

Assim, apesar de tardio, o início da física foi auspicioso. Os brasileiros eram físicos notáveis e pró-ativos. Em 1949, alguns deles fundaram o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), e convenceram o governo a criar, em 1951, o hoje Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Esses e outros pioneiros inauguraram uma tradição de rigor e de qualidade que colocou a física em posição de destaque na ciência brasileira e, já a partir do início da década de 1940, no cenário internacional.

Na década de 1950 e na seguinte, a física continuou crescendo com o retorno de brasileiros que foram estudar no exterior. A Universidade de São Paulo (USP) e o CBPF receberam visitantes notáveis – alguns vencedores do prêmio Nobel –, projetando a física brasileira

no exterior. A atuação do CNPq e da atual Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), também criada em 1951, foi decisiva para apoiar os primeiros grupos de pesquisa em física, concentrados no Rio de Janeiro e em São Paulo – e, mais tarde, em Porto Alegre e Belo Horizonte.

O crescimento da física no país se acelerou no final da década de 1960, com a institucionalização do regime de tempo integral para docentes nas universidades públicas e – tão importante quanto – da institucionalização da pós-graduação. A criação da Sociedade Brasileira de Física (SBF), durante a 18ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), em Blumenau (SC), em 1966, em assembleia convocada e presidida pelo físico José Goldemberg, foi muito importante para promover a articulação da comunidade nacional.

Em 1969, o físico Sérgio Maschenhas – discípulo de Gross e Costa Ribeiro e pioneiro na interiorização da física no país, ao migrar do Rio de Janeiro para São Carlos (SP) – organizou o primeiro Simpósio Nacional de Física do Estado Sólido, que antecedeu os Encontros Nacionais de Física da Matéria Condensada, promovidos pela SBF a partir de 1977. Em 1970, já havia cerca de 100 físicos com doutorado no Brasil – a maioria em física teórica –, e os primeiros programas institucionais de doutorado tinham sido implantados.

Na década de 1970, houve grande impulso à física e outras áreas da ciência, com a criação do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), operacionalizado pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), cujos

apoios institucionais possibilitaram a implantação de laboratórios de pequeno e médio portes em mais de 30 universidades em todo o país. No início da década seguinte, já havia cerca de 700 físicos com doutorado, sendo aproximadamente 300 deles em física da matéria condensada – cerca de 35 doutores eram formados por ano.

Em 1990, eram 1 mil físicos com o título de doutor, em mais de 40 instituições (eram formados em média 70 doutores/ano). Na virada do século, já tínhamos cerca de 2 mil doutores em física, e já estava em operação exitosa, desde 1997, a primeira instalação de porte médio-grande do país, o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), projetado e construído no Brasil, sob a liderança do físico Cylon Gonçalves da Silva.

## CENÁRIO ATUAL

Atualmente, há mais de 4,5 mil físicos com doutorado atuando em mais de 150 instituições, entre universidades, extensões universitárias e centros de pesquisa. Há 59 programas de pós-graduação em física e astronomia reconhecidos pela Capes, sendo 15 deles com conceitos seis ou sete, considerados de nível internacional.

Todas as áreas de pesquisa em física estão cobertas, com os seguintes percentuais aproximados de físicos em relação ao total: física da matéria condensada e óptica (49%); partículas elementares, campos e altas energias (13%); cosmologia e astrofísica (12%); física atômica e molecular (8%); física estatística e computacional (7%); física nuclear (6%); física de plasmas, dinâmica não linear e fluidos (2%); física biológica (2%); outras áreas (1%).

Essa distribuição por áreas é semelhante à de vários países desenvolvidos. Porém, há uma diferença importante: lá os físicos teóricos representam cerca de 30% do total, enquanto aqui são 50%. Uma forte razão para nossa elevada fração de teóricos é que aqui mais de 90% dos físicos estão na academia ou nos centros públicos de pesquisa, enquanto lá de 30% a 50% deles trabalham em empresas.

Apesar de dificuldades históricas, os físicos das áreas experimentais, como materiais, óptica, física biológica, atômica, molecular e nuclear, dispõem atualmente de boa infraestrutura de la-

boratórios, com equipamentos de pequeno e médio porte sofisticados, financiados por recursos do governo federal e de vários estados. Nas áreas experimentais que requerem grandes instalações, como partículas, altas energias e astrofísica, muitos físicos participam de colaborações internacionais, como as do Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN), na Europa, do LIGO (sigla, em inglês, para Laboratório de Ondas Gravitacionais por Interferência a *Laser*), nos EUA, e do Projeto Auger, na Argentina.

Nas cinco décadas de existência da SBF, a física no Brasil cresceu bastante e mudou para melhor. A maior parte das publicações de físicos atuando no país é feita nas melhores revistas do mundo – a física é a única área da ciência brasileira cujas publicações têm impacto maior que a média mundial.

Os físicos têm tido papel de liderança na ciência no país, atuando como professores, pesquisadores, reitores, pró-reitores, dirigentes de instituições, secretários de estado e ministros. Alguns deles criaram empresas de alta tecnologia bem-sucedidas, como a Opto, a AsGa, a *Lasertools*, a Recepta, entre outras.

Entretanto, apesar do grande avanço, os resultados da física no Brasil ainda não têm grande impacto científico em comparação com os de muitos outros países e quase não têm consequências para a tecnologia. Não é exagero afirmar que a maior contribuição da física para nosso desenvolvimento econômico tem sido na formação de engenheiros. Os físicos estão concentrados nas universidades e em alguns centros de pesquisa, tendo muito pouca inserção nas empresas.

A física é uma ciência experimental, e seu desenvolvimento é baseado no método científico, que envolve ideias teóricas, hipóteses, raciocínio e experimento. Quando a teoria é muito afastada do experimento, ela pouco contribui para o avanço da física. O peso exagerado da física teórica no Brasil não tem contribuído para aumentar seu impacto científico no mundo e sua importância para a tecnologia.

## GRANDES DESAFIOS

Os desafios para a física no Brasil são enormes. Em primeiro lugar, é preciso atrair mais e melhores estudantes para a física, pois eles serão os físicos do futuro. Isso requer maior envolvimento da comunidade da área na busca de caminhos para aprimorar o ensino de ciências nas escolas.

Alguns dos desafios são evidentes – e já têm a participação de muitos físicos: melhorar a formação de professores (licenciaturas); planejar e/ou participar de projetos para treinar e aperfeiçoar professores já formados; desenvolver módulos (*kits*) para o ensino de ciência experimental nas escolas; organizar/participar de iniciativas para popularizar a ciência na sociedade, como museus de ciência, visitas abertas e guiadas a laboratórios de pesquisa, dar palestras em escolas, escrever artigos de divulgação, entre outros.

Também é preciso melhorar o ensino de graduação em física. A maior parte dos cursos de bacharelado tem currículos inflexíveis e que são praticamente os mesmos há várias décadas. É importante educar os físicos para os desafios atuais. A educação deve ser sólida nos fundamentos, mas deve ter flexibilidade para que os estudantes possam escolher caminhos próprios.

Aos estudantes excelentes, deve ser dada a possibilidade de queimar etapas e concluir o curso em menos tempo. Os laboratórios de ensino de graduação devem ser interessantes e estimulantes para encorajar a opção pela física experimental. Os cursos de engenharia física, criados recentemente em algumas universidades, contribuem para atrair mais estudantes para a área.

A física continuará expandindo as fronteiras do conhecimento e sendo uma das áreas mais importantes da ciência. Ela se tornará mais entrelaçada

com outras áreas, como a química e a biologia, e continuará sendo a que mais contribui para o desenvolvimento de novas tecnologias.

No Brasil, também ela vai continuar evoluindo e melhorando de qualidade; porém, o ritmo do processo vai depender da atitude dos físicos atuais. Para aumentar o impacto da pesquisa em física feita no país, será preciso trabalhar em temas mais próximos da fronteira e mais competitivos. Os cursos de pós-graduação devem oferecer mais opções para áreas interdisciplinares e estimular a física experimental, bem como arriscar mais nos problemas propostos para os estudantes de doutorado.

É importante aumentar a internacionalização da física, ampliando os projetos de colaboração, atraindo pós-doutores e facilitando a contratação de físicos estrangeiros. Nas áreas que requerem grandes instalações, é importante aumentar a participação brasileira nas grandes redes de colaboração internacional.

No país, é preciso concluir as instalações de médio-grande porte cujos projetos foram iniciados há vários anos, como o Sirius, uma fonte de luz síncrotron de última geração no LNLS, e o Reator Multipropósito Brasileiro, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, em São Paulo (SP). E dar andamento a grandes projetos de colaboração internacional na América do Sul, liderados por brasileiros, como o Lattes (sigla, em inglês, para Grande Rede de Telescópios para a Busca de Fontes Energéticas).

## FUTURO DO PAÍS

Naturalmente, a evolução da física no Brasil, como também das outras áreas da ciência, dependerá dos recursos financeiros e humanos, bem como das políticas de ciência e tecnologia dos governos. Para serem competitivas, a física experimental e a física computacional, por exemplo, requerem infraestrutura de laboratórios e equipamentos sofisticados. Os desafios somente serão vencidos com investimentos adequados e com a continuidade e regularidade de ações e programas. Infelizmente, essa é uma dificuldade histórica que continuamos a vivenciar.

Na primeira década deste século, os recursos para a ciência do governo federal e de vários estados cresceram continuamente, dando à comunidade científica a esperança de que os investimentos em ciência e tecnologia (C&T) iriam se aproximar daqueles dos países desenvolvidos – ou seja, cerca de 3% do Produto Interno Bruto (PIB).

Os fundos setoriais de C&T, criados em 1999 e alocados ao FNDCT, pareciam assegurar legalmente recursos para o setor. Porém, a lei foi ‘contornada’ por meio do chamado contingenciamento, pelo qual parte dos recursos arrecadados para os fundos ficava retida no Tesouro Nacional.

O Plano Nacional de Ciência & Tecnologia e Inovação, lançado em 2007, previa um conjunto de ações e programas, visando financiar toda a cadeia do conhecimento e a interação academia-empresa, bem como eliminar o contingenciamento do FNDCT. Isso foi realmente alcançado em 2010, quando a totalidade das receitas dos fundos foi destinada ao setor. Entretanto, com a mudança no governo federal, quase todos os programas foram gradualmente desativados, e o FNDCT voltou a ser contingenciado – o valor executado em 2015 foi metade do valor em 2010.

É essencial que a comunidade científica do Brasil se mobilize, para mostrar aos governos a necessidade de assegurar não só investimentos para C&T em patamares na faixa de 2% a 3% do PIB, mas também programas e ações com continuidade e regularidade de calendários.

Cortar recursos para C&T significa sacrificar o futuro do país. ■

