

## Carta do Editor

**E**stamos celebrando o Ano Mundial da Física (AMF) cujo objetivo principal é a divulgação da Física em todos os setores da sociedade exaltando sua relevância como a ciência mais fundamental (não quer dizer que seja a mais importante!), suas contribuições para melhor compreensão do Universo em que vivemos e para o desenvolvimento tecnológico. Na educação, buscamos alertar o público e as autoridades para a necessidade imperiosa da melhoria do ensino desta disciplina em todos os níveis e, em particular, estabelecer estratégias para motivar os jovens para o estudo da Física.

A escolha do ano de 2005 deve-se à comemoração do centenário dos trabalhos produzidos por Albert Einstein que tiveram um impacto extraordinário na Física do século XX: a teoria da relatividade restrita, a hipótese do fóton, a equivalência da massa-energia e a teoria do movimento browniano e suas implicações para a confirmação da existência de átomos.

No Brasil, a Sociedade Brasileira de Física escolheu o XVI Simpósio Nacional do Ensino de Física realizado no início do ano no Rio de Janeiro para abrir as atividades do AMF-2005 de modo a registrar categoricamente sua preocupação com a qualidade atual do ensino de Física.

Nesta edição, dedicada ao AMF, prestamos um tributo a Einstein que se inicia com um ensaio sobre seus trabalhos de 1905 por Ildeu C. Moreira. Carlos Fiolhais, físico português e autor de *Física Divertida*, nos convence de que a Física, decorridos 100 anos dos trabalhos de Einstein, continua a nos dar prazer e divertir. O menos badalado artigo de Einstein sobre o movimento browniano, mas de fundamental importância para a aceitação da hipótese atômica da matéria, é abordado em nível acessível ao Ensino Médio (assim esperamos!), por Silvio Salinas. Os primeiros anos de Einstein são percorridos numa conversa imaginária com ele mesmo

concebida por Alexandre Medeiros dando seqüência à série de entrevistas com grandes cientistas. O movimento político em favor da paz proposto pelo filósofo Bertrand Russel e por Einstein é discutido por Fernando de Sousa Barros que realça o caráter pacifista do grande cientista. A contribuição do “radiante céu do Brasil” à comprovação da teoria da relatividade geral durante o eclipse de 1919 em Sobral é descrita pelo historiador Antonio Augusto Passos Videira. Um cânone da literatura sobre Einstein publicada no Brasil foi estabelecido pelo físico e divulgador da Ciência Carlos Alberto Santos. Ao final apresentamos uma cronologia da vida de Einstein.

A *FnE* traz uma série de artigos de divulgação com o intuito de atualizar e motivar os leitores para temas atuais da Física Contemporânea. Luis Carlos de Meneses mostra como a Física permeia todo o nosso cotidiano a partir de observações em sua própria sala de trabalho. Áreas da Física mais fundamentais como a cosmologia, as partículas elementares e as interações fundamentais da natureza são descritas por Rogério Rosenfeld, José Helayël-Neto e Maria Cristina Abdalla. A matéria em sua forma mais bem estruturada e a nanotecnologia (o que é e para que serve?) são discutidas por Belita Koiller e Peter Schulz, respectivamente. Rita de Oliveira introduz o leitor no mundo da complexidade, dos sistemas caóticos e dos fractais. São temas bastante atuais e de muito interesse para nossos alunos.

Visando ao uso de novas tecnologias da informação e comunicação no ensino de Física, Flávia Rezende e Susana de Sousa Barros exploram os sistemas hiper-mídia de aprendizagem de Ciências com exemplos concretos. Eliane Veit e colaboradores mostram

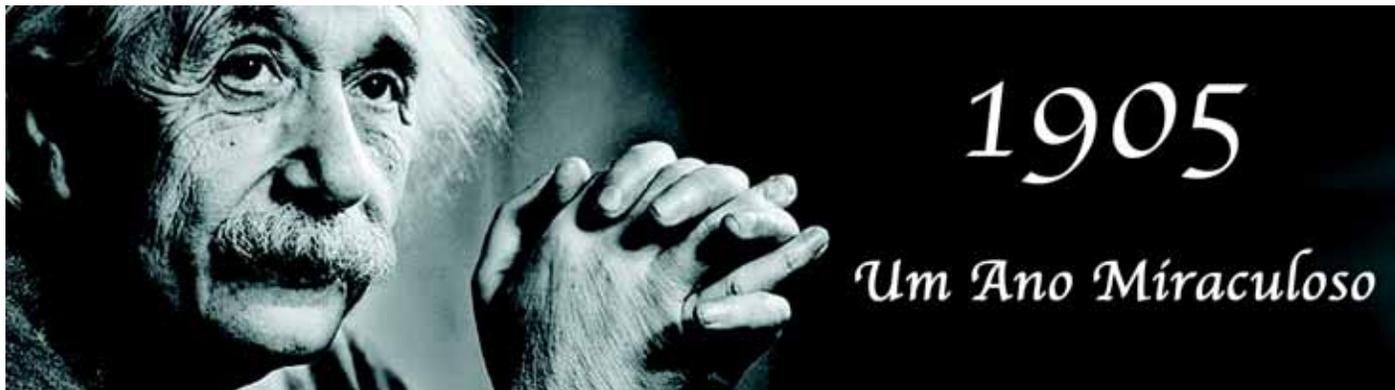
a importância da aquisição automática de dados em um laboratório básico de ensino e sugerem formas de introduzi-la. Simples e eficazes experimentos e demonstrações de física moderna para o Ensino Médio são apresentados em artigo de Marisa Cavalcante, Cristiane Tavoraro e Rafael Haag.

Sugerimos ainda a leitura do livro *Física Para o Brasil: Pensando Para o Futuro*, elaborado pela SBF, para uma visão geral sobre a Física desenvolvida atualmente no Brasil e como deve estar inserida na vida social e econômica.

A *FnE* continua com sua campanha para inserir a Física Moderna e Contemporânea em todos os níveis de ensino. Esperamos que esta edição especial, além de reverenciar a figura de Albert Einstein, contribua para este fim.

*Nelson Student*





.....  
**Ildeu de Castro Moreira**

Instituto de Física,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

.....

### Introdução

**B**erna (Suíça), meados de maio de 1905. Após uma noite de reflexões intensas, um empregado de 3ª classe do escritório de patentes, que mal completara 26 anos, agradece a seu amigo Michele Besso (1873-1955): “Obrigado! Resolvi completamente o problema. Uma análise do conceito de tempo é a solução.” No dia anterior, Albert Einstein (1879-1955) tinha discutido com Besso cada detalhe de uma questão que o

perseguia há tempos. Seis semanas depois, enviaria um manuscrito para a prestigiosa revista *Annalen der Physik*, estabelecendo a relatividade especial e unificando duas áreas da Física: a mecânica e a eletrodinâmica. Em setembro, como consequência da nova teoria, deduziu a expressão  $E = mc^2$ . Com essa fórmula – talvez, a mais famosa da Ciência –, fundiu as leis da conservação da massa e da energia. Meses antes, em março, havia proposto uma hipótese radical, que levaria quase duas décadas para ser aceita: a luz exibe um comportamento corpuscular, ou seja, granular.

É impressionante que um único cientista, em poucos meses, tenha dado contribuições tão importantes para a Ciência e que alteraram profundamente nossas concepções sobre o espaço e o tempo, bem como sobre a estrutura da radiação. Outra revolução, mais silenciosa e que se estendeu por séculos, receberia um impulso essencial de Einstein no mesmo ano: a teoria atômica da

matéria. Em abril, com sua tese de doutoramento sobre as dimensões moleculares e, em maio, com sua análise do movimento browniano, ele possibilitou a confirmação experimental definitiva da existência de átomos e moléculas. Não é à toa que 1905 foi designado o *annus mirabilis* – em latim, ano miraculoso, admirável – de Einstein. Entre março e setem-

bro, produziu cinco trabalhos extraordinários que mudariam a face da Ciência moderna e que o tornariam o cientista mais famoso do século passado.

Uma das mais importantes e intrigantes cartas da história da Ciência, de Einstein para seu amigo Conrad Habicht (1876-1958), em maio de 1905, registrou esse momento:

*Eu lhe prometi quatro trabalhos. O primeiro trata da radiação e das propriedades energéticas da luz e é muito revolucionário como você verá. O segundo é uma determinação dos tamanhos reais dos átomos a partir da difusão e da viscosidade de soluções diluídas de substâncias neutras. O terceiro prova que, baseado na hipótese da teoria molecular do calor, corpos da ordem de 1/1000 mm, suspensos em líquidos, devem executar um movimento aleatório observável, que é produzido pelo movimento térmico; de fato, os fisiologistas observaram movimentos de pequenos corpos em suspensão, inanimados, os quais chamam de ‘movimento browniano’. O quarto artigo, neste momento apenas um rascunho grosseiro, é uma eletrodinâmica de corpos em movimento,*

**$E = mc^2$ .**  
**Com essa fórmula – talvez, a mais famosa da Ciência – Einstein fundiu as leis da conservação da massa e da energia**

---

Há 100 anos, um jovem físico, trabalhando como técnico de 3ª classe em um escritório de patentes em Berna (Suíça), publicou cinco trabalhos. Todos de excelente qualidade. Dois deles mostrariam, com base em teorias simples e elegantes, como poderia ser demonstrada experimentalmente a realidade física de átomos e moléculas, assunto ainda controverso no início do século passado.

Os três artigos restantes alteraram profundamente a face da física moderna. No primeiro a ser concluído naquele ano, o jovem rebelde e contestador propôs o que mais tarde ele classificaria como a idéia mais revolucionária de sua vida: a luz, sob certos aspectos, apresenta uma natureza granular. Em julho e setembro, concluiu os dois últimos artigos de 1905 e aos quais seu nome estaria associado para sempre. Eles, em conjunto, dariam origem à teoria da relatividade, que destruiria o caráter absoluto atribuído, durante séculos, ao tempo e ao espaço. Seu nome: Albert Einstein.



Einstein em seu primeiro emprego como perito de patentes.

*que utiliza uma modificação da teoria do espaço e do tempo.*

Vamos fazer uma incursão por esses trabalhos, que, escritos em estilo conciso e direto, são jóias preciosas da cultura universal. Sempre que possível, nos apoiaremos nas palavras de Einstein. Comentaremos também características de seu autor e aspectos do contexto da Ciência, da tecnologia e da cultura de sua época que podem contribuir para um melhor entendimento de sua façanha.

### Uma idéia revolucionária

A disputa sobre a constituição da luz – se onda ou partícula – tem uma história que remonta ao século 17, com os ingleses Isaac Newton (1643-1727) e Robert Hooke (1635-1703) e o holandês Christiaan Huygens (1629-1695). Newton defendia uma teoria corpuscular para a luz, ao contrário de seus dois contemporâneos. Ao longo do século 18, o modelo newtoniano predominou, embora tendo críticos importantes. No século seguinte – com o inglês Thomas Young (1773-1829) e o francês Augustin Fresnel (1788-1827) e com as experiências de dois outros franceses, Armand Fizeau (1819-1896) e Leon Foucault (1819-1868) –, a teoria

ondulatória ganharia força e se consolidaria com a teoria eletromagnética da luz proposta pelo escocês James Clerk Maxwell (1831-1879).

A luz passa, então, a ser vista como uma onda eletromagnética que se propaga no éter, o meio material que, acreditava-se, lhe dava suporte. Mas, no início do século passado, um problema começou a obscurecer o céu da teoria ondulatória para a radiação luminosa: como explicar a intensidade da radiação emitida por um material aquecido, a uma dada temperatura, em função da frequência dessa mesma radiação? A teoria ondulatória usual não conseguia descrever corretamente o fenômeno – que ganhou o nome

‘radiação do corpo negro’, porque o experimento passou a ser feito usando-se um recipiente metálico fechado, aquecido, e observando-se a radiação emitida por uma pequena abertura nele feita. O físico alemão Max Planck (1858-1947), em uma tentativa desesperada de encontrar uma solução, fez a hipótese, em 1900, de que a troca de energia

entre a radiação luminosa e a matéria só pode ocorrer através de quantidades com um certo valor mínimo – o quantum de energia – e não de forma contínua, como exigido pela teoria ondulatória. Insatisfeito com sua própria proposta e considerando-a um artifício provisório, Planck tentaria inúmeras vezes encontrar outra maneira de chegar à expressão experimentalmente correta a que chegara e que preservasse o caráter contínuo da radiação.

Einstein, com seu trabalho de março de 1905, ‘Um ponto de vista heurístico sobre a produção e a transformação da luz’, vai muito além de Planck. Com grande ousadia e originalidade, introduz uma hipótese física revolucionária: a própria radiação tem uma estrutura discreta (ou atomística). Seu propósito era, além de buscar uma

unificação na descrição física da natureza, explicar fenômenos novos, como o efeito fotoelétrico, que não podiam ser entendidos com base na física clássica: “Penso que as observações sobre a radiação do corpo negro, a fotoluminescência, a produção de raios catódicos [elétrons] pela luz ultravioleta, e outras classes de fenômenos concernentes à produção e à transformação da luz, parecem mais compreensíveis se admitirmos que a energia da luz está distribuída de maneira descontínua no espaço. Segundo a hipótese proposta aqui, na propagação de um raio luminoso, emitido por uma fonte pontual, a energia não está distribuída de maneira contínua sobre

**Segundo a hipótese proposta aqui, na propagação de um raio luminoso, emitido por uma fonte pontual, a energia não está distribuída de maneira contínua sobre espaços cada vez maiores, mas é constituída de um número finito de *quanta* de energia localizados em pontos do espaço, cada um se deslocando sem se dividir e podendo ser absorvido ou produzido apenas em bloco**  
Einstein, 1905

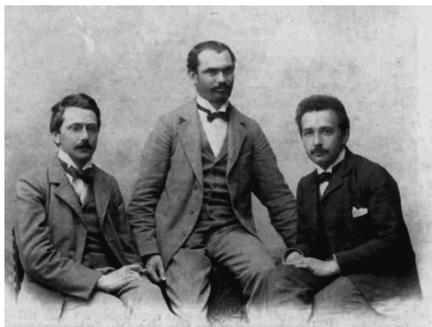
espaços cada vez maiores, mas é constituída de um número finito de *quanta* de energia localizados em pontos do espaço, cada um se deslocando sem se dividir e podendo ser absorvido ou produzido apenas em bloco.” Esta última frase é, talvez, a mais revolucionária na Física do século passado. Nascia o conceito de fóton – nome dado

ao quantum de luz após 1926 – e, com ele, a era da física quântica moderna.

A partir desse conceito, Einstein deduziu uma expressão matemática para descrever o efeito fotoelétrico, no qual elétrons são arrancados de pla-



O escritório de patentes de Berna no tempo em que Einstein trabalhava lá.



Membros Fundadores da Academia Olímpica: a partir da esquerda Conrad Habicht, Maurice Solovine e Einstein.

cas metálicas pela incidência de radiação. Mas anos se passariam antes que a expressão de Einstein fosse confirmada por experimentos realizados pelo físico norte-americano Robert Millikan (1868-1953). Este diria mais tarde: “Passei dez anos da minha vida testando a equação de Einstein de 1905. Contrariando minhas expectativas, em 1915, fui compelido a validá-la sem ambigüidade, apesar de seu caráter não razoável, pois parecia violar tudo o que sabíamos sobre a interferência da luz.” A descoberta da lei do efeito fotoelétrico daria a Einstein o prêmio Nobel de Física de 1921.

No entanto, se a fórmula proposta por Einstein foi confirmada, a idéia dos quanta de luz enfrentava a oposição da imensa maioria dos físicos, entre os quais Planck, Millikan e o dinamarquês Niels Bohr (1885-1962). Foi somente após a descoberta do chamado efeito Compton – descoberto, em 1923, pelo físico norte-americano Artur Compton (1892-1962) e no qual, como se fosse uma partícula, a luz (ou melhor, um fóton) tem a direção de sua trajetória desviada ao colidir com um elétron – e com as experiências dos alemães Hans Geiger (1882-1945) e Walther Bothe (1891-1957), em 1925, que o conceito viria a ser aceito amplamente pelos físicos.

Em 1909, Einstein, em um de seus momentos mais visionários, havia proposto uma fusão das características ondulatórias e corpusculares da radiação. Sete anos depois, desenvolveu a idéia da emissão e da absorção estimuladas da luz – que daria as bases teóricas para o desenvolvimento do *laser* na década de 1950. Mas o problema de um entendimento com-

pleto do comportamento da luz se estende até os dias de hoje.

### A dança dos átomos

O movimento irregular de uma partícula muito pequena mergulhada em um fluido – fenômeno denominado movimento browniano – é ocasionado por choques com as moléculas do fluido, que estão agitadas em razão de sua energia térmica (calor). Essa foi a principal inferência feita por Einstein em seu segundo trabalho de 1905: ‘Movimento de partículas em suspensão em um fluido em repouso como conseqüência da teoria cinética molecular do calor’. Einstein previu a variação (média) na posição da partícula ocasionada por essas colisões, variação essa que pode ser medida pela observação em um microscópio. Deduziu também uma maneira de se calcular o número de Avogadro (cerca de  $6 \times 10^{23}$ ), ou seja, o número de átomos (ou moléculas) existentes em uma quantidade pré-fixada – o chamado átomo-grama (ou moléculagrama) – de um elemento químico ou substância.

Einstein terminou o trabalho oferecendo aos oponentes da teoria atômica um experimento que poderia testar a sua previsão: “Se [ela] não estiver correta, isso significaria um argumento de peso contra o conceito cinético-molecular de calor. Esperemos que logo venha um pesquisador para elucidar esta questão importante para a teoria do calor.” Esse desafio encontrou ressonância no físico francês Jean Perrin (1870-1942). Após cuidadosos experimentos que confirmaram as previsões de Einstein, Perrin concluiu em 1913: “A teoria atômica triunfou. Numerosos ainda há pouco, seus adversários enfim conquistados renunciaram, um após o outro, às desconfianças que por longo tempo foram legítimas e, sem dúvida, úteis. Será em torno de outras idéias que prosseguirá agora o conflito dos ins-

tintos de prudência e audácia, cujo equilíbrio é necessário para o lento progresso da Ciência humana.”

A tese de doutorado de Einstein, pela Universidade de Zurique (Suíça), ‘Uma nova determinação das dimensões moleculares’, girava em torno do mesmo tema: a existência e o comportamento dos átomos e das moléculas. Ele combinou resultados da hidrodinâmica clássica com os da teoria da difusão para criar um novo método de determinação das dimensões moleculares e do número de Avogadro. Para isso, teve que trabalhar com uma teoria molecular para os líquidos, tarefa bem mais difícil que para os gases. Os átomos e as moléculas não podiam ser observados diretamente pelos microscópicos então existentes. Einstein inventou uma maneira indireta de fazê-lo: uma teoria simples e elegante que, a partir da medida de quantidades macroscópicas, como a viscosidade de um líquido e o coeficiente de difusão de uma substância nele imersa, permitia determinar as dimensões das moléculas dissolvidas. Usou os dados disponíveis para o açúcar dissolvido na água e, com isso, pode fazer uma boa estimativa das dimensões das moléculas. O trabalho, assim como a interpretação estatística do movimento browniano, foi aceito rapidamente e deu início à teoria das flutuações, que encontrou depois enorme gama de aplicações científicas, indo da economia à matemática.

**Em 1909, Einstein, em um de seus momentos mais visionários, havia proposto uma fusão das características ondulatórias e corpusculares da radiação. Sete anos depois, desenvolveu a idéia da emissão e da absorção estimuladas da luz – que daria as bases teóricas para o desenvolvimento do *laser* na década de 1950**

pretação estatística do movimento browniano, foi aceito rapidamente e deu início à teoria das flutuações, que encontrou depois enorme gama de aplicações científicas, indo da economia à matemática.

A tese foi concluída em 30 de abril de 1905, mas teve uma história longa e tortuosa. Em 1901, Einstein havia já submetido uma dissertação à Universidade de Zurique – esse original não sobreviveu –, mas retirou-a no início de 1902, possivelmente por sugestão de seu supervisor Alfred Kleiner (1849-1916). Em janeiro de 1903, abandonou seus planos de tese dizendo: “Essa comédia toda já me aborreceu.” Em 1905, no entanto, retomou

à idéia do doutorado. As razões eram claras: isso podia ajudá-lo na ascensão no escritório de patentes e abriria a chance de uma carreira acadêmica. Segundo sua irmã, Maja (1881-1951), ele tentou inicialmente que o trabalho sobre a relatividade constituísse a dissertação, o que teria sido rejeitado. Voltou-se, então, para uma questão ao feitiço dos físicos de Zurique, uma investigação mais solidamente escorada em experimentos. E teve êxito. Einstein veria também, posteriormente, falharem várias tentativas de conseguir um certificado para lecionar nas universidades, o que só conseguiria em 1908. Outro detalhe curioso, difundido em algumas de suas biografias, é que Kleiner aprovou a tese de 1905, mas reclamou que ela estava muito curta – 17 páginas apenas. Einstein acrescentou uma única frase, e ela foi aceita sem comentários, o que divertiu particularmente seu autor.

### Novas concepções sobre espaço e tempo

Enviado em 30 de junho de 1905, o artigo ‘Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento’ abordava o conflito aparente entre a teoria eletromagnética e o princípio da relatividade – pelo qual as leis da Física devem ter a mesma forma para todos os observadores inerciais, ou seja, não acelerados –, originado da mecânica clássica. O eletromagnetismo oferecia uma descrição unificada dos fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos e

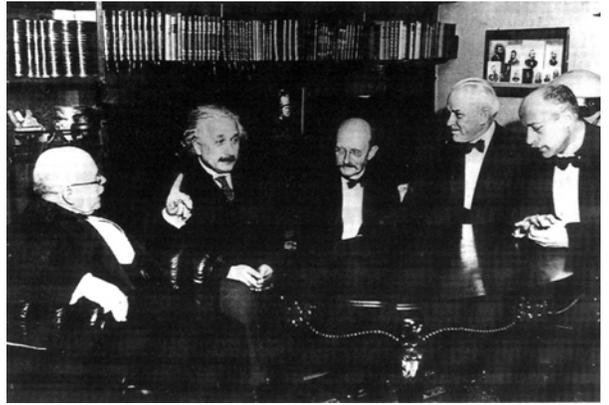


Einstein e seu melhor amigo Michele Besso, a quem agradece no artigo da Relatividade pela colaboração e valiosas sugestões.

tinha já décadas de sucesso. Por outro lado, a mecânica clássica contava com mais de 200 anos de êxito quase absoluto em seu domínio descritivo. No entanto, as equações de Maxwell do eletromagnetismo não são compatíveis com o princípio da relatividade, que está na base da mecânica clássica. Como conciliá-los? Hipóteses *ad hoc* – ou seja, forjadas a partir do fenômeno que querem explicar e sem maiores fundamentações teóricas – haviam sido formuladas, especialmente pelo físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928), mas não ofereciam uma solução teórica aceitável aos olhos de Einstein. Sua proposta será radical e aparentemente inconsistente: estender o princípio da relatividade para toda a Física e introduzir a hipótese adicional da independência da velocidade da luz em relação ao movimento da fonte que a emite.

O início do artigo de Einstein deixa claro seu propósito de unificar as duas teorias:

*Como é bem conhecido, a eletrodinâmica de Maxwell – tal como usualmente aceita no momento – quando aplicada a corpos em movimento, produz assimetrias que não parecem ser inerentes aos fenômenos. (...) Exemplos desse tipo, juntamente com as tentativas infrutíferas de detectar qualquer movimento da Terra em relação ao “meio luminoso”, sugerem que os fenômenos da eletrodinâmica, assim como os da mecânica, não possuem propriedades correspondentes à idéia de repouso absoluto. Sugere-se, além disso, (...) que as leis da eletrodinâmica e da óptica sejam válidas para todos os sistemas de referência para os quais as equações da mecânica são válidas. Elevaremos essa conjectura (o conteúdo da qual será daqui para frente chamado de “Princípio da Relatividade”) ao status de um postulado, e também introduziremos outro postulado, que é apenas aparentemente irreconciliável*



Físicos influentes na época: Da esquerda para a direita, Walther Nernst, Einstein, Max Planck, Robert Millikan e Max von Laue.

*com o primeiro, a saber, que a luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida  $c$ , que é independente do estado de movimento do corpo emissor. Esses dois postulados são suficientes para se construir uma teoria simples e consistente (...). A introdução de um “éter luminífero” provar-se-á supérflua ...*

Note-se a coragem do jovem físico ao eliminar, com uma frase curta, a noção de éter de suas considerações, conceito que era um paradigma secular da Física como meio transmissor da luz e aceito como ‘realidade’ por praticamente todos os cientistas de sua época. O resultado, decorrente de suas premissas, de que a luz tem a mesma velocidade para todos os observadores, quaisquer que sejam seus movimentos, estava em conflito com o senso comum e com a mecânica de Newton, que previa velocidades diferentes quando medidas por observadores que se movem um em relação ao outro. Isso forçou Einstein a uma revisão dos fundamentos cinemáticos da Física: rediscutiu os conceitos de tempo e de espaço e a maneira como são mensurados. Sua nova definição para se medir o tempo e sincronizar os relógios, por meio de sinais luminosos, levou ao abandono da noção de tempo absoluto: dois eventos que são simultâneos para um observador (com um relógio) em repouso não são simultâneos para um observador em movimento. Da nova formulação decorrem alguns resultados físicos importantes:



A coordenação de relógios nas torres de Berna poderia ter contribuído para a definição de simultaneidade proposta por Einstein.

i) o tempo flui em taxas diferentes para observadores em movimento relativo entre si; tanto os intervalos de tempo quanto os comprimentos medidos variam com o observador, dando origem, respectivamente, ao que se convencionou chamar dilatação temporal e contração espacial;

ii) a nova lei de somas das velocidades – que não obedece mais à soma direta das velocidades  $v = v_1 + v_2$ , como ocorria na mecânica newtoniana – permite resolver a aparente inconsistência entre seus dois princípios já mencionados;

iii) ocorre variação da massa do objeto com a velocidade.

Essa reformulação dos conceitos fundamentais de tempo e espaço, tomados como dados *a priori* por séculos, constitui-se certamente em uma das revoluções mais importantes da Ciência, embora seu próprio autor não pensasse assim: ele a via como um aperfeiçoamento da física clássica.

Em setembro de 1905, em um artigo de apenas três páginas, com um título interrogativo, 'A inércia de um corpo depende de seu conteúdo energético?', Einstein deduziu uma fórmula, relacionando a energia (inércia) de um corpo com sua massa, que indica que quantidades muito pequenas de massa podem ser convertidas em

quantidades enormes de energia e vice-versa. A massa e a energia são de fato equivalentes. Concluiu o artigo de maneira cuidadosa, mas premonitória: "A massa de um corpo é uma medida de seu conteúdo de energia; se a energia muda de  $E$ , a massa varia no mesmo sentido de  $E/c^2$ ... Não é impossível que, com corpos cujo conteúdo de energia é variável em um alto grau (por exemplo, com sais de rádio), a teoria possa ser colocada à prova com sucesso. Se a teoria corresponder aos fatos, a radiação carrega inércia entre os corpos emissores e os corpos absorvedores." Escreveu na época para um amigo: "O argumento é divertido e sedutor; mas, por tudo que sei, o Senhor poderia estar zombando comigo..." Não era zombaria. Na década de 1930, experimentos vieram confirmar as expectativas ali colocadas. E, em 1945, a bomba atômica – que Einstein, por muito tempo, duvidou que pudesse ser construída e cujo uso condenou fortemente – mostraria, de forma trágica, o acerto e o poder de suas idéias.

Note-se que o físico e matemático francês Henri Poincaré (1854-1912), independentemente de Einstein, desenvolveu trabalhos importantes sobre a relatividade e deduziu muitas das expressões matemáticas contidas na teoria. No entanto, por razões variadas, que têm sido muito discutidas pelos historiadores – entre as quais, sua visão filosófica mais convencionalista e menos realista que a de Einstein e a manutenção da noção de éter – não atribuiu uma realidade física significativa às expressões a que chegara, ao contrário de Einstein.

Em 1907, o matemático russo Hermann Minkowski (1864-1909), que havia sido professor de Einstein na Escola Politécnica de Zurique (Suíça), teve a importante idéia de considerar o espaço e o tempo conjuntamente, constituindo um contínuo quadridimensional no qual o tempo,

como quarta dimensão, funde-se com as outras três espaciais. Concepção similar fora já expressa por Poincaré. Na apresentação de suas idéias, Minkowski diria em 1908: "As visões de espaço e tempo que desejo apresentar a vocês cresceram do solo da física experimental e daí nasce o seu vigor. Elas são radicais. Daqui para frente, o espaço por si mesmo, e o tempo por si mesmo, estão destinados a se tornarem meras sombras, e somente uma espécie de união dos dois preservará uma realidade independente."

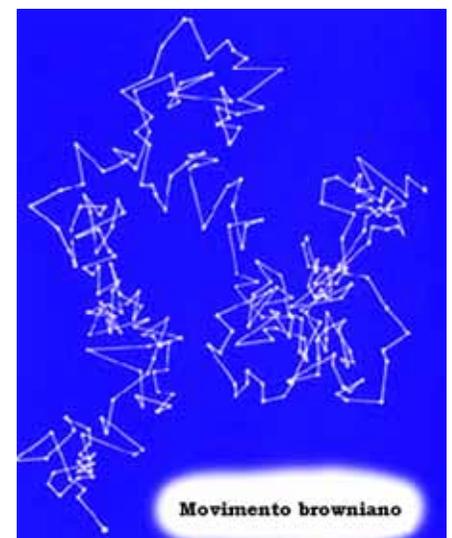
### O contexto e a fonte da criatividade

Um motivo de intensa discussão e controvérsia entre os estudiosos da

**Poincaré também desenvolveu trabalhos importantes sobre a relatividade e deduziu muitas das expressões matemáticas contidas na teoria. No entanto, ele não atribuiu uma realidade física significativa às expressões a que chegara, ao contrário de Einstein**

obra de Einstein é a fonte de sua criatividade e os caminhos que o conduziram a suas teorias. Ele não tinha o costume de guardar seus manuscritos, nem se preocupou muito em reconstruir a linha de suas reflexões. Mas muitas reconstruções

históricas, mais ou menos plausíveis, têm sido feitas, levando em conta suas



Trajétoria aleatória de uma pequena partícula imersa em um líquido. Figura original do livro *Átomos* de Perrin que comprovou experimentalmente a teoria de Einstein.

características particulares, a situação da Física em sua época e o contexto em que estava inserido.

Segundo ele mesmo, o que o distinguia era uma insaciável curiosidade: “Eu não sou nem especialmente inteligente, nem especialmente dotado. Sou apenas curioso, muito curioso.” Esse aspecto, aliado a uma grande capacidade de autodidatismo, iniciara-se já na infância. Exibia também uma capacidade muito grande de concentração e de se dedicar intensamente a um mesmo problema por anos a fio. Até 1905, Einstein de certa forma corria por fora, às margens da Ciência institucionalizada. Era dotado de notável autoconfiança e alta dose de rebeldia: “Sou um herético”, repetia com frequência. A pouca reverência com as autoridades, inclusive universitárias, e a postura crítica permanente quanto às verdades adquiridas foram sempre um traço marcante de sua personalidade e podem ter contribuído para sua dificuldade em conseguir um cargo em universidades depois de formado, em 1900. Note-se que Einstein conviveu na Suíça, como estudante universitário, em um ambiente no qual abundavam socialistas, anarquistas e intelectuais contestadores e inovadores.

Outro aspecto marcante em Einstein é sua visão de Ciência. Tinha profunda crença na racionalidade do mundo: o real pode ser descrito por leis científicas, e o comportamento da natureza ser entendido a partir de alguns princípios gerais e esteticamente belos. A Física deveria ser formulada a partir de princípios abrangentes e ‘simples’, e as teorias devem naturalmente resistir ao crivo experimental. Os artigos de 1905 ini-

**Do ponto de vista filosófico, os avanços fundamentais que Einstein realizou em 1905 dependeram de modo crucial de sua forte adesão a uma crença na realidade das entidades físicas no nível atômico, preconizada por Maxwell e Boltzmann**

ciam-se quase todos com uma insatisfação de Einstein com alguma assimetria ou incompatibilidade entre domínios da Física e a necessidade de superá-las a qualquer custo. Toda sua obra gira em torno de buscar descrições unificadoras da Física. Isso ocorreu, como vimos, no caso da rela-

tividade. Também, ao propor a hipótese do quantum de luz, não foi movido por nenhum experimento particular. Partiu da constatação de uma profunda diferença formal entre a descrição da matéria e a dos campos eletromagnéticos. Enquanto a teoria da matéria pressupõe um número finito de átomos – ou seja, partículas distribuídas de forma descontínua no espaço –, a teoria eletromagnética faz uso de ondas, que são descritas por funções matemáticas contínuas.

No contexto formativo, o envolvimento da família de Einstein em negócios ligados à tecnologia elétrica – uma das fronteiras tecnológicas da época – deve tê-lo influenciado significativamente. Seu pai – que queria vê-lo formado em engenharia elétrica – e seu tio produziam equipamentos de precisão para medidas elétricas e dinamos. Por outro lado, como estudante universitário, Einstein passava longas horas no laboratório: “Trabalhei a maior parte do tempo no laboratório de Física, fascinado com o contato direto com a experiência.” Já sua atividade no escritório de patentes – de junho de 1902 a outubro de 1909 – foi “uma verdadeira benção para mim. Isso me

forçou a um pensamento multilateral e também forneceu um importante estímulo para a reflexão em Física”. Ao longo de sua vida, o interesse pelas máquinas permaneceu aceso: tirou algumas patentes de invenções feitas sozinho ou com colegas – uma delas, a de um refrigerador, desenvolvido juntamente com o físico húngaro Leo Szilard (1898-1964). Seu trabalho na análise das patentes pode ter também contribuído para seu estilo direto e pouco usual de escrever artigos científicos no qual,

**Sou um herético, repetia Einstein com frequência. A pouca reverência com as autoridades, inclusive universitárias, e a postura crítica permanente quanto às verdades adquiridas foram sempre um traço marcante de sua personalidade e podem ter contribuído para sua dificuldade em conseguir um cargo em universidades depois de formado**

à colocação clara do cerne do problema, se segue o elenco de premissas, o desenvolvimento dos modelos – ou das teorias – e as conseqüências experimentais deles decorrentes.

Einstein era um mestre na arte, que teve também expoentes em Galileu e Maxwell, de construir experimentos mentais – produzidos apenas na imaginação e que estão além de nossa capacidade de realizá-los diretamente no laboratório – para refletir sobre os princípios básicos da Física. Já em 1895, com 16 anos, começou a refletir sobre a questão do éter e a propagação da luz. Concebeu de

início um experimento mental que o acompanharia por dez anos: o que ocorre se acompanharmos uma onda luminosa com a mesma velocidade dela? Ela ficaria ‘congelada’, em uma estranha forma de onda não movente? Para Einstein, esse experimento mental juvenil foi o primeiro passo para a teoria da relatividade especial. Em 1902, com dois amigos Habicht e Maurice Solovine (1875-1958), criou um ‘clube’ informal, a Academia Olímpica. Leram e discutiram longamente vários autores clássicos, incluindo obras de físicos e filósofos. Nessa última categoria, entre os que mais o influenciaram, estavam Poincaré e o físico austríaco Ernst Mach (1838-1916), com textos que tratavam da crítica aos fundamentos da mecânica clássica, bem como o estatístico inglês Karl Pearson (1857-1936) e o filósofo escocês David Hume (1711-1776), com críticas sobre o procedimento da indução em ciência, além de Maxwell e do físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906). Do ponto de vista filosófico, os avanços fundamentais que Einstein realizou em 1905 dependeram de modo crucial de sua forte adesão a uma crença na realidade das entidades físicas no nível atômico, preconizada por Maxwell e Boltzmann.

O contexto no qual Einstein se in-



Einstein em Princeton, na sua residência em Mercer Street.

sere é também essencial para que se entenda sua obra e o impacto dela decorrente. Viveu em uma época de profunda transição na Ciência: a Física passava por uma crise, e os conceitos e as teorias construídos nos séculos anteriores se defrontavam com novos domínios da experiência. Entre os anos 1895 e 1904, muitas descobertas importantes foram feitas – como os raios X, a radioatividade, as ondas de rádio e o elétron – bem como novas técnicas experimentais foram desenvolvidas, permitindo perscrutar o interior da matéria. É interessante destacar que Einstein construiu sua teoria da relatividade abstrata em um contexto de um mundo material rodeado de máquinas elétricas e de mecanismos transmissores de sinais elétricos e de ondas eletromagnéticas. Patentes e invenções de novos equipamentos eletromecânicos e propostas para a sincronização de relógios – um importante proble-

ma da época – foram o seu cotidiano por anos. Até em sua caminhada diária para o trabalho, passava pelas grandes torres com relógios que determinavam a coordenação do tempo em Berna. Note-se que Poincaré

também abordou a questão da sincronização dos relógios sob vários ângulos. Além de refletir filosoficamente sobre a medida do tempo, ao presidir o Bureau de Longitude ele ajudou a desenvolver métodos para cobrir o mundo com um tempo sincronizado, pela utilização de transmissões telegráficas.

Tudo isso mostra que algumas das visões predominantes sobre Einstein são parciais e incorretas. A visão empirista ingênua atribui a origem de seus trabalhos à tentativa direta de explicar experimentos – como o de Michelson-Morley, no caso da relatividade – que a física clássica tinha dificuldade em tratar. Já uma visão antipositivista vê em seus trabalhos apenas o pensamento abstrato, distante dos experimentos e do entorno material e tecnológico que o circundava. Esta última visão contribui para um dos mitos persistentes sobre Einstein: o de um pensador completamente desligado das coisas terrenas. Visões ambas parciais e que distorcem a complexidade do processo criativo na Ciência.

Einstein viveu, refletiu e produziu em uma arena onde convergiam: i) a física, na tradição dos grandes mestres e que se defrontava com novos resultados experimentais intrigantes; ii) a filosofia, com a crítica à natureza do conhecimento e às noções clássicas sobre o tempo e o espaço; iii) a tecnologia, com os aparelhos elétricos, os relógios e as novas radiações que enchem o final do século 19. Essa interseção tripla de fatores foi certamente um ponto importante na construção de suas teorias.

### A sagrada curiosidade

Einstein nasceu em Ülm (sul da Alemanha), em 14 de março, e mor-

reu em Princeton (Estados Unidos), em 18 de abril, aos 76 anos de idade. Viveu profundamente também as contradições políticas e sociais de seu tempo. Lutador incansável pela paz, socialista ‘emocional’ e crítico do socialismo real, opôs-se ao nazismo, ao macartismo – perseguição a supostos simpatizantes de regimes de esquerda nos Estados Unidos –, à guerra e à corrida armamentista. Pagou alto preço pessoal por isso. Quanto ao mito de gênio que o cerca, traduzido na figura de um velho cientista excêntrico e isolado, com cabelos brancos e desgrenhados, ele mesmo deu a receita: “É curioso ver como a gente aparece aos olhos dos outros. Foi meu destino que minhas realizações fossem supra-avaliadas além de todos os limites, por razões incompreensíveis. A humanidade necessita de alguns poucos ídolos românticos como *spots* de luz no campo da existência humana. Eu me tornei um tal *spot* de luz.”

Ao rememorarmos o *annus mirabilis* de Einstein, vale encerrar lembrando o que para ele era o cerne da atitude científica diante do mundo: “A coisa importante é não parar de questionar. A curiosidade tem suas próprias razões para existir. (...) Nunca perca a sagrada curiosidade.”

Artigo originalmente publicado na *Ciência Hoje* v. 36, n. 212, p. 34-41 (2005).

### Sugestões para leitura

- J. Stachel, (org.) *O ano miraculoso de Einstein – Cinco artigos que mudaram a face da Física* (Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 2001).
- A. Pais, *Sutil é o Senhor... A Ciência e a Vida de Albert Einstein* (Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995).
- A. Fölsing, *Albert Einstein* (Penguin Books, Harmondsworth, 1997).
- A. Einstein, *A teoria da relatividade especial e geral*. (Contraponto Editora, Rio de Janeiro, 2000).
- D. Brian, *Einstein: A Ciência da Vida* (Ática, São Paulo, 1998).

**É curioso ver como a gente aparece aos olhos dos outros. Foi meu destino que minhas realizações fossem supra-avaliadas além de todos os limites, por razões incompreensíveis**  
Einstein



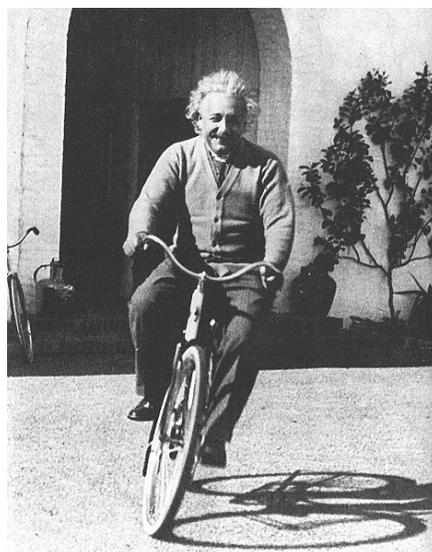
## Einstein e o Prazer da Física: Passados Cem Anos, a Física Continua Divertida

**A**lbert Einstein, que evocamos neste Ano Mundial da Física, era um físico divertido. Para o saber basta ler o seu melhor biógrafo, Abraham Pais: além da monumental obra *Sutil é o Senhor* [1], que foca a atividade científica, publicou *Einstein Viveu Aqui* [2], mais centrado nos aspectos humanos. A sua pose nunca foi de um professor sério e solene, como era costume nos inícios do século XX. Sempre foi uma pessoa acessível, mesmo quando os jornais, depois do eclipse solar de 1919, o colocaram nos píncaros da fama. O seu lado informal, de uma informalidade por vezes surpreendente, foi até ganhando espaço com o decorrer dos anos, à medida que a sua aura lhe permitia libertar-se de algumas convenções sociais. A imagem que nos ficou dele não foi tanto a do jovem bem composto, de pequeno bigode e casaco xadrez, funcionário da repartição de patentes de Berna, na Suíça, mas mais a do sábio bonachão, cabelos desgrenhados, de camisola larga e sandálias nos pés, que, já aposentado, habitava uma vivenda em Princeton, nos Estados Unidos.

O lado “leve” de Einstein refletese também em muitas das suas afirmações, orais ou escritas, que não raro surpreendiam pela sua forte carga de humor e que em alguns casos ficaram mesmo proverbiais. Julgo, por isso, que a figura de Einstein devia ser mais usada no Ensino Médio para atrair os alunos para o estudo da Física e para ajudar a afastar a noção, infelizmente bastante difundida, de que a Física é uma disciplina aborrecida. Einstein foi um gênio dificilmente igualável, mas esse fato não deve

inibir os professores do Ensino Médio de apresentarem-no aos seus alunos e de darem uma idéia, ainda que sumária, do seu trabalho e da sua obra.

O Ano Mundial da Física tem sido uma excelente oportunidade para exibir uma variada iconografia einsteiniana. Entre essas imagens incluem-se Einstein, com um sorriso, a passear de bicicleta, ou com um blusão desportivo, ao leme do seu barco. Uma das imagens mais correntes de Einstein mostra o sábio com a língua provocatoriamente de fora. Com base nessa imagem fizeram-se posters e “T-shirts”. Há quem pense que a imagem da língua de fora é um engraçado truque fotográfico, uma divertida fotomontagem. Quando há alguns anos publiquei essa imagem na capa da revista *Gazeta de Física*,



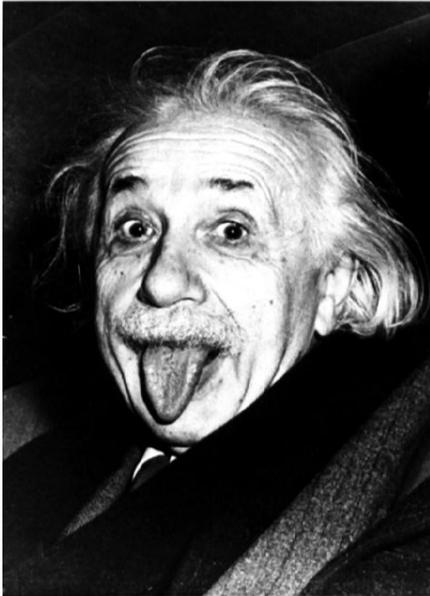
Einstein de bicicleta em Santa Barbara, Califórnia, EUA, em 1933. O sábio declarou um dia: *A vida é como uma bicicleta: para manter o equilíbrio tem de se andar para a frente.*

.....  
**Carlos Fiolhais**

Centro de Física Computacional da  
Universidade de Coimbra  
e-mail: [tcarlos@teor.fis.uc.pt](mailto:tcarlos@teor.fis.uc.pt)  
<http://nautilus.fis.uc.pt/~cfiolhais>  
.....

---

Apresenta-se o lado informal e divertido de Einstein, que é revelado tanto pelas suas famosas imagens como pelas suas notáveis frases. E descreve-se sumariamente o método que ele usou para atingir um melhor conhecimento do mundo.



Einstein com a língua de fora na festa de aniversário em 1951.

órgão da Sociedade Portuguesa de Física (pode ver-se a revista *on-line* no nosso sítio [3]; e Einstein voltou recentemente a ser tema de capa quer em um artigo sobre a recepção de suas idéias em Portugal, quer em outro artigo em que se explica o modo revolucionário como resolveu efeito fotoelétrico [4, 5]), houve quem pensasse que os editores estavam a perseguir o ilustre professor e prêmio Nobel, adulterando a sua imagem. Mas nada de mais falso: a imagem é mesmo verdadeira e foi muito bem aceita pelo próprio. Foi tirada em Princeton quando o físico comemorou 72 anos,

portanto quatro anos antes de falecer de um aneurisma na aorta. Na altura Einstein era já famosíssimo. No fim da festa, muitos repórteres apinhavam-se para captar imagens do homenageado. Um deles, ao serviço da United Press International, foi mais feliz que os seus colegas. Exclamou “Professor, sorria por favor” e o professor, em vez de sorrir, lançou-lhe divertidamente a língua de fora. Deste modo a língua de Einstein ficou a parte mais famosa do seu corpo

(depois do cérebro, claro, este infelizmente objeto de um furto pelo médico que fez a autópsia, que está relatado no livro, algo fantasioso, publicado em Portugal e no Brasil, *Ao Volante com Mr. Albert*, de Michael Paterniti [6]). Ora, Einstein gostou da foto que outros, mais einsteinianos do que o próprio Einstein

(isto é, mais papistas que o papa), detestaram. Não só pediu ao fotógrafo uma cópia para si como autografou outra para dar ao fotógrafo. Se todas as pessoas que têm usado essa foto pagassem direitos, o fotógrafo ou os seus descendentes estariam hoje bastante ricos... O teatro e o cinema têm ajudado a propagar a imagem de Einstein com a língua de fora. Com efeito, em uma peça de teatro auto-biográfica representada pelo grupo Teatro-Ciência de São Paulo, Einstein deita a língua de fora. Também em um recente documentário da BBC sobre Einstein, a cena de seu 72º aniversário foi recriada logo no início. A imagem de Einstein com a língua de fora retrata bem uma personalidade que não gostava do culto da personalidade: é uma imagem de uma pessoa que não receia as convenções, de um físico que se diverte, de um cientista que é profundamente humano. A Física é feita por humanos e nesse sentido é uma ciência humana. Os alunos gostarão decerto de saber isso...

**A Física é feita por humanos e nesse sentido é uma ciência humana. Os alunos gostarão decerto de saber isso...**

quando se está sentado sobre um fogão quente ou quando se tem, em um banco de jardim, uma bela rapariga sentada ao colo... (parece que ele disse mesmo isto!) Por outro lado, Einstein usava e abusava dos paradoxos, uma das maneiras mais inteligentes de fazer humor. Por exemplo, foi isso o que ele fez quando disse que *o fato mais incompreensível na Natureza é ela poder ser compreendida*. Ou quando ele disse que *para me castigar de desprezar as autoridades, o destino fez de mim uma autoridade*. Ou mesmo ao dizer, a propósito de Deus, que *só a Sua não-existência o poderia absolver dos Seus lapsos* (acrescente-se, para melhor compreensão da frase, que Einstein não acreditava em um Deus que se preocupasse com as ações humanas, o Deus da tradição judaico-cristã, mas usava liberalmente a

**Einstein usava e abusava dos paradoxos, uma das maneiras mais inteligentes de fazer humor. Exemplos:**

***Para me castigar de desprezar as autoridades, o destino fez de mim uma autoridade***

ou

***O fato mais incompreensível na Natureza é ela poder ser compreendida***

tarão decerto de saber isso...

O Ano Mundial da Física tem também servido para divulgar algumas das sentenças do homenageado. Einstein é autor de um sem número de citações, frases que têm corrido o mundo e que têm sido repetidamente citadas nas mais varia-

das circunstâncias. Embora na Internet se possam encontrar sítios com muitas dessas frases, a melhor coletânea é, sem dúvida, a que foi reunida por Alice Calaprice, uma estudiosa do

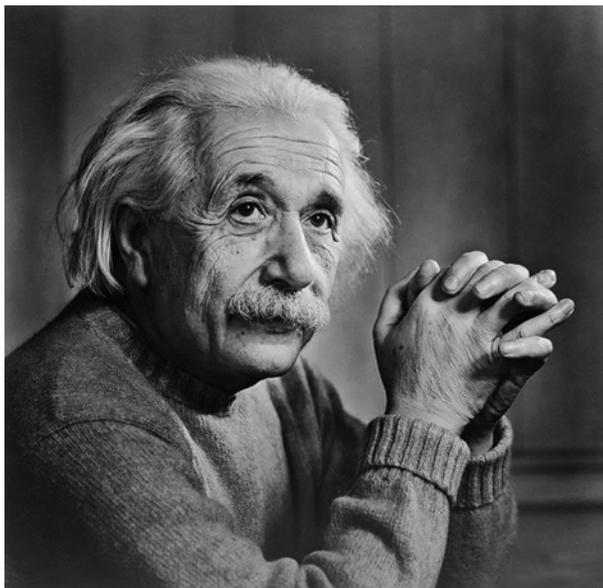
espólio do físico: *The New Quotable Einstein* [7]). As frases de Einstein, sempre plenas de sentido, são por vezes de uma ironia mais do que fina: refinada. Por exemplo, quando ele

disse, em um tom evidentemente anedótico, que a teoria da relatividade significava que se media o tempo de maneira diferente

quando se está sentado sobre um fogão quente ou quando se tem, em um banco de jardim, uma bela rapariga sentada ao colo... (parece que ele disse mesmo isto!) Por outro lado, Einstein usava e abusava dos paradoxos, uma das maneiras mais inteligentes de fazer humor. Por exemplo, foi isso o que ele fez quando disse que *o fato mais incompreensível na Natureza é ela poder ser compreendida*. Ou quando ele disse que *para me castigar de desprezar as autoridades, o destino fez de mim uma autoridade*. Ou mesmo ao dizer, a propósito de Deus, que *só a Sua não-existência o poderia absolver dos Seus lapsos* (acrescente-se, para melhor compreensão da frase, que Einstein não acreditava em um Deus que se preocupasse com as ações humanas, o Deus da tradição judaico-cristã, mas usava liberalmente a



Einstein no seu veleiro, em um lago de Princeton, com Anna Fantova, uma amiga bibliotecária dos últimos tempos de vida.



Uma das fotos mais clássicas de Einstein, tirada por Y. Kash em 1948.

palavra Deus para falar de Natureza). Ou ainda quando genialmente disse, procurando desculpar-se de uma falta de genialidade: *Não sou nenhum Einstein!*

A Ciência era para Einstein *a coisa mais preciosa que temos*. A expressão que reproduzi no título do meu livro saído na editora Gradiva [8] foi extraída da frase: *A Ciência pode parecer primitiva e infantil, mas é a coisa mais preciosa que temos*. E essa “coisa mais preciosa” constituía para Einstein uma evidente fonte de prazer, tal como de resto a arte musical. Ele estabelecia uma boa ponte entre as duas, como o mos-

tra a seguinte frase: *A música de Mozart é tão pura e bela que a vejo como um reflexo da beleza interna do Universo*. Einstein vivia de e para a Ciência, apenas com algumas pausas para tocar ou ouvir música, nomeadamente o violino que haveria de deixar em testamento ao seu neto mais velho. A sua vida familiar não podia deixar de se ressentir dessa dedicação. Talvez tenha sido por isso que os seus dois casamentos não foram bem sucedidos, o primeiro de uma maneira mais evidente do que o segundo (apesar de apreciar o belo sexo, ele fez algumas declarações misóginas, como por

**Einstein vivia de e para a Ciência, apenas com algumas pausas para tocar ou ouvir música, nomeadamente o violino que haveria de deixar em testamento ao seu neto mais velho**

exemplo quando declarou que *muito poucas mulheres são criativas*). Ao sábio pouco interessavam bens materiais (chegava-lhe, disse ele um dia, uma escrivãzinha, comida e uma cama) nem honrarias, que aceitava para ser simpático para quem o queria honrar mas às quais não atribuía demasiado valor (a visita ao Brasil, pormenorizadamente relatada nos livros *Einstein e o Brasil*, organizado por Ildeu de Castro Moreira e António Passos Videira [9], e *Einstein - O Viajante da Relatividade*

*na América do Sul*, de Alfredo Tiomno Tolmasquin [10], é sobre isso bem elucidativa). A Física – a descoberta do mundo – era o seu *leit-motiv*, o seu contínuo comprazimento. Mais modernamente, o mesmo aconteceu com outro físico muito midiático, Richard Feynman, também Prêmio Nobel da Física (os dois estiveram no Brasil, note-se a coincidência divertida; de resto, os dois foram objeto de peças de teatro auto-biográficas representadas pelo grupo Teatro-Ciência!). Os nomes de Einstein e Feynman deviam ser “servidos” aos alunos como heróis modernos da Física.

Claro que já o são, mas podem sê-lo ainda mais...

Como é que Einstein chegou ao conhecimento do mundo? Declarou um dia: *Não tenho nenhuns talentos especiais, sou apenas uma pessoa apaixonadamente curiosa*. E em uma outra altura: *O mais importante é não parar de fazer perguntas*. A curiosidade tem a sua própria razão de ser. A curiosidade, o querer saber, é, de fato, a mola real da Ciência. A procura da solução do puzzle é mais estimulante do que o próprio puzzle. Não se pára enquanto não se chega ao fim... Em Ciência, as soluções são sempre provisórias, mas

a procura de soluções, essa sim, é permanente. *A imaginação é mais importante do que o conhecimento*, afirmou ele em outra ocasião, em resposta à questão sobre se confiava mais na sua imaginação ou no seu conhecimento: a imaginação abre as portas ao conhecimento e o conhecimento de alguma forma limita a imaginação (Feynman afirmou, no seu livro *O Que é uma Lei Física* [10], que a imaginação do cientista está contida dentro de uma camisa de forças). Ora, aqui está mais uma lição tanto para os professores como para os estudantes...

Foi já bastante comentado e discutido mas não é demais lembrar o modo como Einstein alcançava o conhecimento físico. Como é que a sua imaginação atuava? Criava imagens com as quais realizava “Gedankenexperimente” (a palavra alemã para “experiências mentais”), tais como uma pessoa que viaja sobre um fóton, no caso da relatividade restrita, ou a experiência da queda de uma pessoa dentro do elevador, no caso da relatividade geral (e que ele considerou uma das imagens mais férteis da sua vida, um “aha” só comparável ao de Newton quando viu cair a maçã; mas Einstein, em vez de ver cair a maçã, imaginou-se a cair com a maçã!). As questões que se podem colocar a propósito dessas duas “Gedankenexperimente” são



Einstein a tocar violino, em 1934, a bordo de um navio em rota para os Estados Unidos.

perturbadoras. Que é que vê uma pessoa que viaja à velocidade da luz? E alguém a cair, será que sente o seu próprio peso? O poder das imagens pode, portanto, prevalecer sobre o poder das fórmulas matemáticas ou das palavras. Vê-se, em primeiro lugar, com os olhos da mente... E é por isso que as simulações computacionais interativas são cada vez mais usadas no ensino da Física (uma feita no Departamento de Física da Universidade Federal de

**A Física é uma disciplina que hoje em dia continua a ser praticada em muitos centros e laboratórios por numerosas pessoas, porque há ainda muito mundo físico para se descobrir. Esse fato devia também fazer parte do discurso pedagógico**

Santa Catarina sobre a relatividade restrita foi, pela sua qualidade, escolhida para inclusão no portal português de Ciência, ensino das ciências e cultura científica “Mocho” [12]).

O objetivo de Einstein, o objetivo da Ciência, consiste em unir coisas que estão dispersas, em simplificar o que parece complicado. Segundo ele, *a ciência é a tentativa de fazer a diversidade caótica da nossa experiência sensorial corresponder a um sistema logicamente uniforme de pensamento* (a conhecida frase *devem tornar-se as coisas tão simples quanto possível mas não mais simples do que isso*, atribuída a Einstein, parece ser apócrifa). Foi guiado por esse princípio que ele chegou à teoria da relatividade, primeiro restrita e depois geral. Queria simplesmente mostrar que existia um único princípio da relatividade, válido tanto para o eletromagnetismo como para a mecânica, já que o princípio da relatividade de Galileu não se adequava ao eletromagnetismo. E quis também mostrar que existia um princípio da relatividade válido tanto para sistemas inerciais como para sistemas não-inerciais.

Foi guiado pela ânsia da unificação que o sábio dedicou a maior parte da sua vida não à formulação da teo-

ria da relatividade, mas sim à busca da teoria unificada das forças. Einstein não o disse, mas podia ter dito em uma das suas famosas tiradas: *Deve o homem procurar unir aquilo que Deus separou!* De fato, na segunda metade da sua vida, tentou por vários modos

unir as teorias do eletromagnetismo e da gravidade. O recente documentário da BBC sobre Einstein enfatiza esse fato ao intitular-se “Sinfonia Inacabada”. Einstein falhou repetidamente nessa tarefa de unificação

(no próprio hospital pouco antes de falecer ainda pediu papel e lápis para continuar uns cálculos nessa direção), e esse é o caminho que muitos físicos de hoje prosseguem com permanente esperança. Já se conseguiu até, no quadro da mecânica quântica que Einstein não conseguiu compreender (*Deus não joga aos dados com o Universo*), unificar de modo harmonioso a força eletromagnética com a força nuclear fraca, formando a força eletrofraca, assim como a força eletrofraca com a força nuclear forte. Mas falta, ainda, para obter a alvejada unificação final, juntar a força da gravitação, a força matematizada pela primeira vez por

Newton e compreendida em uma perspectiva geométrica por Einstein (quando descobriu que a geometria do espaço-tempo era moldado pela matéria-energia). Não dispomos, porém, de uma teoria quântica da gravidade que seja con-

vincente. Muito provavelmente alguém um dia a virá a formular. A Física é uma disciplina que hoje em dia continua a ser praticada em muitos centros e laboratórios por numerosas pessoas, porque há ainda muito mundo físico para se descobrir. Esse fato devia também fazer parte do discurso pedagógico: A escola média,

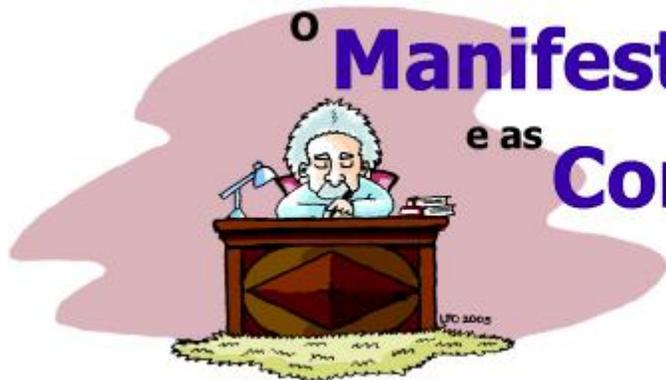
em particular, devia transmitir que a Física não está de modo nenhum acabada e que nem um físico tão genial como Einstein conseguiu pôr termo à Física. Einstein e Feynman acreditavam, tal como muitos físicos, que a Física nunca terá fim, pelo que não poderão concordar com Stephen Hawking quando ele anunciou que estava à vista o “fim da Física”... [13].

Com toda a probabilidade alguém conseguirá um dia subir aos ombros de Einstein para ver mais longe, fazendo crescer a pirâmide humana que hoje incorpora Galileu, Newton, Faraday, Maxwell (foi Newton quem, eloqüentemente, disse, referindo-se certamente a Galileu: *Se consegui ver mais longe foi porque estava nos ombros de gigantes*). E, nesse dia, será reconfirmada uma frase de Einstein: *Deus é sutil, mas não malicioso*, isto é, não é fácil, mas é possível avançar na compreensão do mundo. Passados cem anos depois de Einstein, a Física continua divertida. E a dificuldade faz, evidentemente, parte da diversão.

## Bibliografia

- [1] Abraham Pais, *Sutil é o Senhor* (Gradiva, Lisboa, 1993).
- [2] Abraham Pais, *Einstein Viveu Aqui* (Gradiva, Lisboa, 1996).
- [3] <http://nautilus.fis.uc.pt/~gazeta>
- [4] Augusto Fitas, A Teoria da Relatividade em Portugal no período entre guerras, *Gazeta de Física* **27**:2, 4 (2004).
- [5] Eduardo Lage, O Centenário do quantum de luz, *Gazeta de Física* **28**:1, 4 (2005).
- [6] Michael Paterniti, *Ao Volante com Mr. Albert* (Teorema, Lisboa, 2004).
- [7] Alice Calaprice, *The New Quotable Einstein* (Princeton University Press, Princeton, 2005), com prefácio de Freeman Dyson.
- [8] Carlos Fiolhais, *A Coisa Mais Preciosa que Temos* (Gradiva, Lisboa, 2002).
- [9] Ildeu de Castro Moreira e António Augusto Passos Videira (organizadores), *Einstein e o Brasil* (Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995).
- [10] Alfredo Tiomno Tolmasquin, *Einstein - O Viajante da Relatividade na América do Sul* (Vieira & Len, Rio de Janeiro, 2002).
- [11] Richard Feynman, *O Que é uma Lei Física* (Gradiva, Lisboa, 1989), tradução de Carlos Fiolhais.
- [12] <http://www.mocho.pt>
- [13] Stephen Hawking, *O Fim da Física* (Gradiva, Lisboa, 1994), com prefácio de Carlos Fiolhais.

# O Manifesto Russell-Einstein e as Conferências Pugwash



A carta enviada por Einstein para Russell, em 11 de abril de 1955, concordando com os termos do Manifesto, contém sua última assinatura em um documento público. Sua morte em 18 de abril, sete dias após, de certa maneira precipitou a divulgação do Manifesto e contribuiu para seu impacto imediato. A divulgação do Manifesto por Bertrand Russell para a imprensa internacional foi presidida por Joseph Rotblat, o mais jovem cientista entre os onze assinantes. A época do Manifesto foi caracterizada pela perspectiva do desenvolvimento de arsenais das bombas de hidrogênio, bem mais poderosas do que as bombas atômicas que destruíram Hiroshima e Nagasaki. Foi a era da Guerra Fria, que dividia o mundo em duas partes. Esses fatores dificultaram a preparação de um encontro como proposto no Manifesto, e uma reunião entre cientistas dos “dois lados” foi realizado somente dois anos após, em um remoto vilarejo canadense denominado Pugwash.

**A última assinatura de Einstein em um documento público está na carta enviada a Bertrand Russell, em 11 de abril de 1955. Seu apoio tornou o Manifesto Russell-Einstein um marco na luta pela paz mundial**

Posteriormente, a atuação de Joseph Rotblat foi fundamental para a continuidade dessas conferências, cujo propósito são: (1) alertar sobre o perigo dos arsenais nucleares e (2) propor caminhos alternativos para conflitos entre nações que levem ao desarmamento universal. A série iniciada em 1957 é reconhecida atualmente como as “Conferências Pugwash”. Rotblat e a organização *Pugwash Conferences on Science and World Affairs* receberam

o Premio Nobel da Paz de 1995.

Alguns aspectos especiais, que serão abordados a seguir, são relevantes para a história do Manifesto: (1) Por que Russell teve que apelar para Joseph Rotblat, na época um jovem cientista excluído da ciência “oficial” inglesa, para presidir a divulgação do Manifesto? (2) Quais os atores originais da proposta da conferência internacional que aparece no primeiro parágrafo do Manifesto? (3) Por que Niels Bohr não assinou o Manifesto? (4) Por que Otto Hahn, que há muito tempo vinha se opondo ao uso militar da energia nuclear, além de não assinar o Manifesto liderou a preparação de outra declaração, a Declaração de Mainau?

## O momento do Manifesto

Embora o Manifesto Russell-Einstein tenha sido um documento que marcou o movimento contra armas atômicas na década de 1950, várias iniciativas ocorreram após a 2ª

Guerra Mundial para despertar a opinião pública internacional sobre a necessidade de um sistema internacional de controle das armas nucleares. Era evidente, para os cientistas que assumiam essas iniciativas, a incapacidade das lideranças políticas da época de compreenderem a magnitude devastadora de um conflito nuclear com bombas de hidrogênio<sup>2</sup>.

A significativa participação de cientistas dos dois lados do Atlântico no projeto original de produção da

.....  
**Fernando de Souza Barros**  
Instituto de Física/UF RJ<sup>1</sup>  
e-mail: fsbarros@if.ufrj.br  
.....

O manifesto Russell-Einstein foi lançado em 1955, em plena Guerra Fria. Na época, as duas superpotências, os Estados Unidos e a União Soviética, acumulavam e testavam seus arsenais de bombas atômicas para uma eventual guerra nuclear. Os cientistas já previam o enorme poder de destruição dos arsenais nucleares, principalmente das bombas de Hidrogênio, algo desconhecido para as populações e seus dirigentes. Era previsível também a possibilidade de lançamento acidental de mísseis com ogivas nucleares. O manifesto Pugwash contribuiu para alertar a opinião pública sobre a grande ameaça que pairava sobre o mundo civilizado. Seu efeito foi certamente construtivo, como evidenciado mais tarde, durante a confrontação de 1962, iniciada com a tentativa de instalação de mísseis soviéticos em Cuba. O autor agradece as informações detalhadas fornecidas graciosamente por Sandra Ionno Butcher, responsável pelo projeto “História do Movimento Pugwash” da organização *Pugwash Conferences on Science and World Affairs*.”

bomba atômica foi consequência do reconhecimento de que o estágio em que se encontrava a ciência alemã possibilitaria um empreendimento similar na Alemanha de Hitler. Após a verificação de que o programa alemão havia fracassado, outros motivos apareceram para justificar o Projeto Manhattan. Um dos mais importantes, a evidência do poder de destruição da arma atômica, obtida com os lançamentos de duas bombas sobre cidades do Japão, pode ser apontada como o marco inicial da carreira armamentista da Guerra Fria, entre os Estados Unidos e a União Soviética.

Foi nesse ambiente que um pequeno grupo de cientistas, convencidos de que os desenvolvimentos em curso produziram novas gerações de armas nucleares e novos recursos técnicos para enviá-las a qualquer parte do planeta, ganharam notoriedade por promoverem campanhas contra os testes nucleares. No final da década de 1950, bombas de hidrogênio, 1000 vezes mais potentes que as bombas lançadas no Japão, estavam sendo testadas na atmosfera. Fora das esferas oficiais, o impacto ambiental da média anual de 16 testes nucleares da época, era somente do conhecimento de cientistas que trabalhavam em partes distantes do planeta e que detectavam o aumento da radioatividade ambiental devido aos testes. Em março de 1954 ocorreu o primeiro teste da bomba de hidrogênio norte-americana: o Teste Bravo no Atol de Bikini.

A nuvem radioativa desta bomba atingiu um barco de pesca japonês, o Dragão Feliz, incapacitando membros de sua tripulação e causando uma morte. Esta

**Joseph Rotblat foi o único cientista que saiu do Projeto Manhattan por questões morais. Isso ocorreu quando tomou conhecimento, no final da 2ª Guerra Mundial, que a Alemanha nazista já não tinha condições de fabricar bombas atômicas**

ocorrência circulou na imprensa ocidental da época, motivando o que seria o primeiro debate público envolvendo cientistas que exigiam informações mais detalhadas sobre a radioatividade liberada pela explosão. Foi nesta ocasião que Bertrand Russell conheceu Joseph Rotblat.

Bertrand Russell era reconhecido

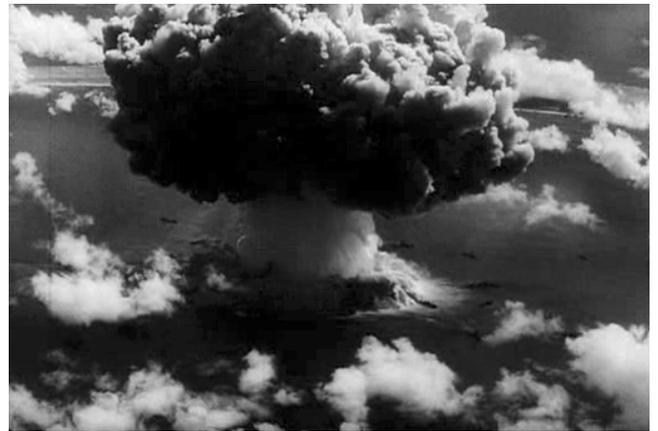
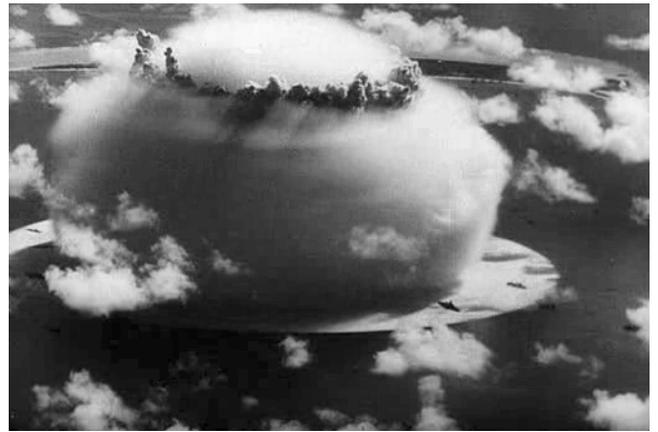
nos meios científicos da época como filósofo e matemático, mas seus ensaios e campanhas pacifistas já causavam impacto na Inglaterra desde o final da 2ª Guerra Mundial. Seu primeiro ensaio, publicado três dias após a bomba na cidade de Hiroshima, em 15 de agosto de 1945, já continha elementos que aparecem no texto do futuro Manifesto: *Esta sombria perspectiva da raça humana está além de qualquer precedente. A humanidade encontra-se perante uma clara escolha: ou adquirimos um pouco de sensatez, ou iremos todos perecer. Uma reviravolta do pensamento político terá que acontecer para que seja evitado o desastre final*<sup>4</sup>.

Embora não sendo físico, Bertrand

Russell tinha conhecimento dos desenvolvimentos na área nuclear e, já em 1945, alertava a Câmara dos Lordes inglesa sobre bombas de fusão: *É concebível um novo dispositivo que guardaria certa semelhança às atuais bombas atômicas, mas que poderia ser utilizado para explosões bem mais violentas, e que decorreria da síntese de elementos mais pesados a partir do hidrogênio. Isso será possível se nossa*

*civilização tecnológica seguir em frente sem se destruir: mas tudo indica que acontecerá*<sup>5</sup>.

Joseph Rotblat foi o único cientista que saiu do Projeto Manhattan por questões morais. Isso ocorreu quando tomou conhecimento, no final da 2ª Guerra Mundial, que a Alemanha nazista já não tinha condições



Seqüência de fotos do Teste Bravo: a primeira logo no início da explosão e acima, quando o cogumelo começa a se formar. Note o tamanho dos navios de guerra colocados próximos ao ponto zero para se avaliar o efeito da explosão sobre uma frota.

de fabricar bombas atômicas. Enfrentando a reação oficial contrária a sua decisão, Rotblat retornou a Inglaterra, onde havia trabalhado antes do início da guerra, e iniciou sua campanha contra as armas atômicas, fundando a Associação dos Cientistas Atômicos (ASA em inglês). Os propósitos dessa associação, assim como aqueles da sua similar norte-americana, a Federação dos Cientistas Atômicos (FAS em inglês), eram, e continuam sendo, o de expor projetos nucleares militares em elaboração pelo mundo, e de contribuir para o conhecimento público das questões das armas de destruição maciça.

Em 13 de abril de 1954, logo após o teste norte-americano da bomba de hidrogênio no Atol de Bikini, e consequente contaminação dos tripulantes do navio pesqueiro japonês Dragão Feliz, a BBC convidou Russell e Rotblat para explicarem para o público o que era a bomba de hidrogênio. Rotblat

abordou os aspectos técnicos e Russell, os éticos e morais. O programa teve uma enorme audiência e provocou um extenso debate na comunidade científica, nos dois lados do oceano Atlântico. O debate técnico estava relacionado com a informação que prevalecia nos meios científicos de que a bomba de hidrogênio não gerava radioatividade. Entretanto, com base nos dados japoneses sobre o efeito da bomba de hidrogênio na tripulação do navio de pesca japonês, *Rotblat* postulou que a bomba de hidrogênio possuía um estágio final do tipo “fissão”, o que seria a razão da contaminação radioativa daqueles tripulantes<sup>6</sup>.

Foram esses os eventos que levaram Bertrand Russell à idéia de organizar um programa de rádio na Inglaterra, com o propósito de atingir o grande público com informações sobre bombas atômicas. O programa “A Humanidade em Perigo” foi um grande sucesso, tendo atingido uma audiência entre 5 a 6 milhões, sendo decisivo para a montagem de um novo evento: o Manifesto Russell-Einstein.

### Os autores do Manifesto

O físico Max Born, que recebeu em 1954 o prêmio Nobel de Física por seus trabalhos teóricos sobre a mecânica quântica, foi um dos primeiros cientistas que contactou Bertrand Russell logo após a divulgação do programa “A Humanidade em Perigo”, em carta datada de 21 de janeiro de 1955. De acordo com Nicholas Griffin<sup>7</sup>: *Born já estava pensando em um apelo aos governos das potências militares da época, que seria assinado por laureados do Prêmio Nobel, mas estava inseguro sobre a melhor maneira de implementá-lo. Max Born solicitou o apoio de Russell à proposta, o que foi aceito de imediato*<sup>8</sup>.

Em um depoimento apresentado por Nicholas Griffin (editor da *The Selected Letters of Bertrand Russell: The Public Years, 1914-1970* (New York, Routledge, 2001) é dito: *Born não tinha condições para o empreendimento: sua saúde era precária e não possuía experiência em atividades de caráter público. A tarefa da organização do apelo ficou então para Russell.*

Born estava alimentando esta idéia há algum tempo, tendo escrito para Einstein em 28 de novembro de 1954 sobre a possibilidade de engajar cientistas laureados com o prêmio Nobel nessa empreitada: *Li recentemente em um jornal a seguinte afirmação atribuída a você: “Se eu tivesse que nascer de novo, eu não seria um físico, mas um artesão”. Essas palavras muito me confortaram pois tenho tido pensamentos similares, face aos males que a nossa bela ciência tem trazido ao mundo... Venho considerando o emprego da minha notoriedade [devido ao prêmio Nobel]... na tentativa de despertar a consciência de nossos pares ao desenvolvimento de tão terríveis bombas*<sup>9</sup>.

Born acompanhou as providências tomadas por Russell, apresentando um relato a Einstein sobre a decisão de Russell em carta de 29 de janeiro de 1955<sup>10</sup>. Nesta carta, Born também informa que sua correspondência com Yukawa, sobre o lançamento de bombas atômicas no Japão, seria publicada em um periódico japonês. Yukawa, prêmio Nobel de Física em 1949 por seus estudos em partículas elementares, foi um dos signatários do Manifesto.

Logo após o programa “A Humanidade em Perigo”, Joliot-Curie, prêmio Nobel de Química de 1935, com contribuições científicas que levaram à “era nuclear”, iniciou sua participação ao Manifesto. Joliot havia participado ativamente da campanha contra as armas nucleares que foi iniciada em um encontro do *Council of Partisans for Peace*, na cidade de Estocolmo, em 1950. Desta iniciativa nasceu o Apelo de Estocolmo, que recebeu eventualmente o apoio de 500 mil de assinaturas<sup>11</sup>. Em 1951, Joliot-Curie havia proposto com Leopold Infeld (outro assinante

do Manifesto), uma Conferência para a Paz Mundial com uma temática mais ampla possível, a fim de atrair um grande número de cientistas de projeção internacional. Ao tomar conhecimento do programa “A Humanidade em Perigo”, Joliot-Curie escreveu para Russell que *...o apoio de uma personalidade do seu porte ao empreendimento ajudaria a realização da conferência*<sup>12</sup>. Russell acatou prontamente a sugestão de Joliot-Curie, enfatizando entretanto a necessidade de que o Manifesto precedesse à conferência. Foi assim estabelecida a troca de mensagens entre esses atores da montagem do Manifesto. Em carta de 11 de fevereiro 1955 para Einstein, Russell menciona a proposta de Joliot-Curie da conferência internacional: *Joliot-Curie aparentemente está convencido da importância de uma grande conferência de homens de ciência*<sup>13</sup>. Em 20 de abril de 1955 Russell visitou Joliot-Curie em Paris. De acordo com Goldsmith [11], Russell teria iniciado este encontro com o comentário *Eu sou anticomunista, mas é o fato de você ser comunista que me induz a trabalhar com você*<sup>14</sup>. Os termos do Manifesto, refletindo a proposta original de Max Born, foram certamente elaborados por Russell, mas como consequência deste encontro com Joliot-Curie, a convocação de cientistas para uma conferência internacional sobre as consequências desastrosas de uma



Fotografia de Leo Szilard, à direita, com Einstein. A foto foi tirada em Princeton, nos Estados Unidos, e supostamente representa o histórico pedido de Szilard para que Einstein escrevesse ao presidente Roosevelt alertando-o sobre a viabilidade das bombas atômicas e que os aliados deveriam construir artefatos nucleares para conter a expansão da Alemanha nazista.

guerra nuclear foi colocada no primeiro parágrafo do Manifesto.

A estatura científica e moral de Albert Einstein foi determinante para o sucesso do Manifesto. No percurso da sua carreira, Einstein sempre atuou em questões políticas sensíveis. Há várias iniciativas que bem caracterizam essa postura de Einstein. Em outubro de 1914, noventa e dois cientistas alemães assinaram o Manifesto Fulda, que proclamava o dever da ciência alemã de estar a serviço da pátria e de suas forças armadas. Logo após, Einstein assinou

**Embora a bomba H seja atualmente o ponto central, ela não exaure a capacidade da ciência de proporcionar novas alternativas, sendo provável que os perigos advindos de material bélico bacteriológico sejam, em pouco tempo, da mesma magnitude. Isso reforçaria a constatação fundamental de que a guerra e a ciência já não podem coexistir**  
**B. Russell para Einstein**

um contra-manifesto, organizado por G.F. Nicolai, que promovia o internacionalismo e a paz<sup>15</sup>. Einstein participou também do *Emergency Committee of Atomic Scientists*, uma iniciativa pioneira de informação ao grande público sobre questões nucleares e para levantar recursos destinados a campanhas contra o uso militar da energia nuclear<sup>16</sup>. Ainda em 1944, Albert Einstein promovia o internacionalismo como alternativa pós-2ª Guerra Mundial, reconhecendo a importância de consultas entre “os cientistas mais destacados” dos países aliados, que na época incluíam a União Soviética, para congregar a influência desses cientistas junto aos respectivos governos, para que sejam criadas forças militares e governo supranacionais<sup>17</sup>.

A contribuição de Einstein para o próprio texto do Manifesto desaparece no seu telegrama de 24 de maio de 1946, em nome do *Committee of Atomic Scientists*: *A conquista da energia atômica mudou tudo exceto a nossa maneira de pensar, e, assim, seguimos a deriva rumo a uma catástrofe sem limites. Nós, os cientistas que liberaram essa imensa fonte de energia, temos uma tremenda responsabilidade nessa disputa mundial de vida-ou-morte, a fim de que a conquista do átomo seja para o benefício de toda a humanidade e não para sua destruição*<sup>18</sup>.

Em 11 de fevereiro de 1955, Ber-

trand Russell enviou uma carta a Einstein, expondo eloquentemente a necessidade do Manifesto: *Como qualquer pessoa capaz de refletir, estou profundamente chocada com a corrida para aquisição de armas nucleares. Você em inúmeras ocasiões expôs seus sentimen-*

*tos e opiniões com os quais concordo inteiramente. Acredito que cientistas eminentes deveriam realizar algum ato dramático para sensibilizar a opinião pública e governantes de que desastres podem ocorrer. Você acredita ser possível reunir talvez seis indivíduos da mais alta reputação científica e, sob sua*

*liderança, preparar um pronunciamento solene sobre a necessidade imperativa de se evitar o conflito armado? Esses indivíduos deveriam possuir posições políticas tão diversas que qualquer declaração com suas assinaturas estaria livre do viés pró ou anticomunista... Atribuo especial importância aos seguintes pontos. Primeiro: seria absolutamente fútil lutar por um acordo que proíba a bomba H. Tal acordo não teria valor após a conflagração de uma guerra; cada lado partiria para a produção do maior número de bombas possível. Segundo: é essencial não considerar alternativas para o uso pacífico da energia nuclear... Terceiro: deve prevalecer rigorosa neutralidade em qualquer sugestão ou proposta para evitar a guerra atômica... Tudo que será afirmado o será em nome da humanidade, não deste ou daquele grupo.*

*Quarto: deve ser enfatizado que a guerra poderá significar o desaparecimento da vida no planeta... Quinto: embora a bomba H seja atualmente o ponto central, ela não exaure*

*a capacidade da ciência de proporcionar novas alternativas, sendo provável que os perigos advindos de material bélico bacteriológico sejam, em pouco tempo, da mesma magnitude. Isso reforçaria a constatação fundamental de que a guer-*

**Concordo com cada palavra sua. Algo deve ser feito nesta circunstância, algo que impressione o público em geral e as lideranças políticas**  
**Einstein para B. Russell**



Eugene Rabinovich foi o cientista norte-americano que participou ativamente da organização da primeira conferência Pugwash em 1957. Rabinovich era então presidente da Federação dos Cientistas Americanos, uma organização que iniciou a campanha contra armas nucleares nos Estados Unidos após a 2ª Guerra Mundial. Rabinovich é reconhecido como um dos fundadores da biofísica.

*ra e a ciência já não podem coexistir*<sup>19</sup>.

Esta carta de Russell recebeu o pleno reconhecimento de Einstein<sup>20</sup>. Em 16 de fevereiro Einstein respondia a Russell: *Concordo com cada palavra da sua carta de 11 de fevereiro. Algo deve ser feito nesta circunstância, algo que impressione o público em geral e as lideranças políticas. Isso poderia ser alcançado em uma declaração pública, assinada por um número pequeno de pessoas – por exemplo, doze indivíduos cujas contribuições científicas (científicas no sentido pleno) lhes deram estatura internacional e cujas declarações não perderão efetividade face às respectivas afiliações políticas. Poderíamos incluir pessoas como Joliot, que são identificadas politicamente, desde que consigamos contrabalançá-las por ou-*

*tras do campo oposto. Sugiro que o texto que será apresentado para as assinaturas seja preparado por duas ou três pessoas – realmente, seria preferível que fosse apenas você – mas de um modo que assegure antecipadamente que haverá*

*total acordo por parte, ou pelo menos, de alguns dos signatários*<sup>21</sup>...

Na carta de 16 de fevereiro, Einstein também prometia solicitar o apoio ao Manifesto a cientistas nos Estados Unidos e propunha nomes de colegas na Europa. Entre esses, estava Leopold Infeld<sup>22</sup>, que era sugerido para ajudar nos contatos com cientistas russos. Einstein também enfatizava a participação de Niels Bohr. Em mensagem posterior Russell informou a Einstein sobre um encontro

**A notícia da morte de Einstein chegou a Russell antes da carta de 11 de abril, quando ele voava de Roma para Paris. Foi um momento duro para Russell, mas chegar no seu hotel, em Paris, ele verificou com emoção que a carta resposta de Einstein estava a sua espera**

que tivera com Nehru, então Primeiro Ministro indú, sobre a possibilidade da Índia liderar uma iniciativa de apoio ao Manifesto, após sua divulgação. Einstein respondeu recomendando que Albert Schweitzer, prêmio Nobel da Paz em 1952, tivesse conhecimento do Manifesto e propõe que Russell se responsabilize pela feitura definitiva do texto e dos planos para sua divulgação (ver no Apêndice, o texto final do Manifesto).

Em carta de 5 de abril, Russell apresentou a versão final do Manifesto a Einstein e relacionou aqueles que iriam assiná-lo. Einstein respondeu para Russell em 11 de abril. Esta última carta de Einstein contém apenas três linhas: *Agradeço sua carta de 5 de abril. Desejo com satisfação assinar sua excelente declaração. Também concordo com sua seleção de possíveis signatários*<sup>23</sup>.

A notícia da morte de Einstein, em 18 de abril de 1955, chegou a Russell antes da carta de 11 de abril, quando ele voava de Roma para Paris. Foi um momento duro para Russell, que reconhecia a importância fundamental do endosso de Einstein para o sucesso do Manifesto. Ao chegar no seu hotel, em Paris, Russell verificou com emoção que a carta resposta de Einstein estava a sua espera<sup>24</sup>.

### As assinaturas ausentes

Como mencionado acima, Einstein e Russell reconheciam a importância da participação de Niels Bohr

para o sucesso do Manifesto. Tal endosso era fundamental face a projeção internacional das contribuições científicas de Bohr, que tinha pleno conhecimento da capacidade de destruição destas novas armas. Bohr era também reconhecido por sua campanha

para a impedir a “corrida nuclear” da Guerra Fria. Einstein enviou carta a Bohr em 2 de março de 1955, incluindo cópia da carta de Russell que descrevia o projeto do Manifesto. Na carta, Einstein escrevia: *Bertrand*

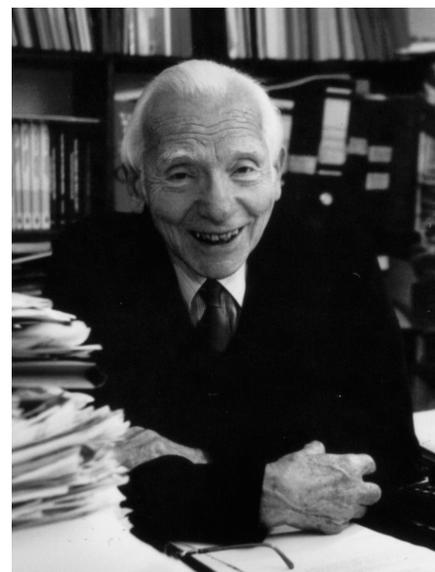
*Russell tem conhecimento [desta carta], tendo pedido que eu escrevesse para você. Evidentemente, ele sabe muito bem que você poderia dar uma grande ajuda ao projeto devido à sua influência, experiência e relações pessoais com pessoas brilhantes; realmente, ele se apercebeu de que sua assessoria e participação ativa são virtualmente indispensáveis para o sucesso do projeto... Será um grande passo se você e Bertrand Russell fizerem um acordo sobre seus pontos principais*<sup>25</sup>.

Na sua autobiografia, Russell informa que enviou repetidas cartas e telegramas para Bohr<sup>26</sup>. Nesta autobiografia, a resposta com a decisão final de Bohr, de 23 de março, de não assinar o Manifesto, tem a seguinte apreciação: *Bohr não acreditou que a declaração teria o efeito desejado, principalmente pela possibilidade de não se conseguir o acesso à informações críticas, considerado como essencial para ele. Ele também temia que a declaração criasse um impasse para a conferência programada nas Nações Unidas, mas afirmou que consideraria a declaração com muita atenção, esperando chegar a uma conclusão mais satisfatória*<sup>27</sup>.

Bohr não assinou o Manifesto nem participou da organização da reunião que eventualmente aconteceu no povoado de Pugwash, priorizando a promoção da conferência das Nações Unidas.

Vários cientistas que não assinaram o Manifesto participaram de uma declaração paralela, reconhecida posteriormente como a Declaração de

Mainau. A proposta desta declaração foi liderada por Otto Hahn, cientista alemão que também se opunha ao uso militar da energia nuclear<sup>28</sup>. Ao tomar conhecimento do Manifesto concebido por Russell, Otto Hahn já se sentia comprometido com a preparação da declaração que seria assinada por cientistas que participariam de reunião científica anual, na Alemanha Ocidental. Esta declaração foi divulgada em 15 de julho de 1955, seis dias após à do Manifesto Russell-Einstein<sup>29</sup>. Embora a declaração liderada por Hahn tenha conseguido eventualmente o apoio de cinquenta e um cientistas, ela não repercutiu fora dos ciclos científicos. Esse fato é reconhecido como devido a atuação reservada de seus mentores. Russell, ao contrário, optou pelo apoio da mídia desde o primeiro momento da preparação da divulgação do Manifesto, o que garantiu sua enorme repercussão. Ainda permanecem sem respostas os motivos porque Hahn não se somou à iniciativa de Einstein e Russell, pois os textos e propósitos dessas duas declarações guardam similaridade, como pode ser apreciado nos seguintes fragmentos da Declaração de Mainau: *Em uma*



*Sir Joseph Rotblat é presidente emérito do Pugwash. Presidente de 1988 a 1997, foi agraciado em 1995 com o Prêmio Nobel da Paz em reconhecimento a seu trabalho, através do Pugwash, a favor do desarmamento nuclear. É Professor Emérito de Física na Universidade de Londres e único signatário vivo do manifesto (foto gentilmente cedida pelo comitê Pugwash).*

## O manifesto Russell-Einstein

Na situação na qual se encontra a humanidade, acreditamos que os cientistas devam realizar uma conferência sobre os perigos que surgiram com o desenvolvimento de armas de destruição maciça, com o propósito de considerarem uma resolução, cujo escopo é proposto em anexo.

Falamos nessa ocasião não como membros dessa ou daquela nação, continente ou crença, mas como membros da espécie biológica dos Homens, cuja sobrevivência é duvidosa. O Mundo está repleto de conflitos; mas, sobrepondo-se a todos, paira a tremenda confrontação entre comunismo e anticomunismo.

Quase todos que são politicamente conscientes têm fortes sentimentos sobre esta questão central e suas conseqüências; mas é nosso apelo que ponham de lado esses sentimentos e que todos se considerem apenas como membros de uma espécie biológica com uma história espetacular e cujo desaparecimento nenhum de nós poderia desejar.

É nosso propósito não emitir qualquer conceito cujo sentido tenda mais para um grupo do que para o outro. Todos, igualmente, estão em perigo, mas, se o perigo for compreendido, existe a esperança de que, juntos, possamos evitá-lo.

Teremos que aprender a pensar de modo diferente. Não deveremos perguntar sobre quais os meios nos levariam a uma vitória militar, qualquer que seja o lado que preferimos, porque esses recursos não existem mais; a questão que deveremos fazer para nós mesmos é: como poderemos evitar o conflito militar cuja conseqüência seria o desastre para todos?

O público em geral, mesmo pessoas em posições de autoridade, não dominam o significado da participação de uma guerra com bombas atômicas. Elas ainda pensam que cidades poderiam ser devastadas e reconhecem que as novas bombas são mais poderosas. Assim, se a bomba atômica pôde devastar Hiroshima, a bomba H poderia ser capaz de arrasas cidades maiores como Londres, Nova Iorque e Moscou.

Não é posto em dúvida que em uma guerra com bombas de hidrogênio, grandes cidades seriam arrasadas. Mas essa seria uma das suas menores conseqüências. Se todos que vivem em Londres, Nova Iorque e Moscou são exterminados, o mundo poderia, em alguns séculos, ser recuperado do golpe. Mas sabemos agora, especialmente desde o teste nuclear de Bikini, de que os efeitos dessas novas bombas nucleares atingirão, gradualmente, áreas bem maiores do que as previamente supostas.

Afirmamos que as bombas que estão sendo produzidas agora são 2.500 vezes

mais poderosas do que aquela que arrasou Hiroshima.

Uma bomba de tal porte, explodindo perto do solo ou d'água, envia partículas radioativas para a parte superior da atmosfera. Essas partículas se depositarão vagarosamente, caindo na superfície terrestre sob a forma de poeira ou de chuva mortíferas. Foi essa deposição que infectou os pescadores japoneses e sua pesca.

Ninguém conhece qual o alcance da difusão dessas partículas, mas as autoridades mais competentes concordam unanimemente que uma guerra com bombas H poderia ser o fim da espécie humana. Existe o temor de que haveria aniquilação global se muitas bombas H fossem utilizadas; a morte seria rápida apenas para uma minoria; para a maioria, seria uma lenta agonia de enfermidades e de decaimento físico.

São muitos os pronunciamentos de cautela de cientistas eminentes e de autoridades em estratégia militar. Nenhum deles afirma que o pior cenário acontecerá. O que é dito é que são conseqüências possíveis, e que ninguém tem certeza do que ocorreria. Não constatamos que as expectativas desses especialistas dependam, em qualquer grau de intensidade, de ideologias ou preconceitos, sendo resultantes do conhecimento específico sobre essas armas. Verificamos que quanto maior é o conhecimento científico da pessoa, maior é o seu pessimismo.

Eis aí, portanto, o dilema que apresentamos sem nuances, inquietante e inescapável: vamos acabar com a espécie humana, ou vamos renunciar à guerra<sup>1</sup>? Mas não se enfrenta este dilema por ser tão difícil abolir a guerra.

Eliminar a guerra implica em duras imposições à soberania nacional<sup>2</sup>. Mas o que talvez impeça muito mais essa superação é que a palavra "humanidade" soa distante e abstrata. As pessoas dificilmente concebem que o perigo alcançaria elas próprias, filhos e netos, mas apenas uma difusa e longínqua humanidade. Elas dificilmente concebem a realidade do perigo iminente como indivíduos, assim como também para aqueles que mais prezam, de perecerem de forma tão terrível. Assim, apenas se espera que, talvez, a guerra possa continuar existindo se essas armas são proibidas.

Essa esperança é ilusória. Qualquer acordo estabelecido em tempo de paz, contrário ao uso das bombas H, não seria respeitado assim que o conflito fosse deflagrado. Os dois campos iniciariam a construção dessas bombas, porque a violação unilateral levaria inevitavelmente à vitória.

Se o acordo do uso de armas nucleares for parte da redução geral de armamentos<sup>3</sup>, não seria alcançada a solução derradeira, mas certamente contribuiria para propósitos importantes.

Primeiro, porque qualquer acordo Leste-Oeste estaria na direção desejável de aliviar a tensão atual. Segundo, a eliminação das armas termonucleares, na eventualidade de cada lado acreditar que o outro está atuando com sinceridade, reduziria o medo de ataque súbito no estilo Pearl Harbour, expectativa que tem contribuído para o estado geral de apreensão dos dois lados. Devemos, portanto, manifestar que tal acordo seria bem-vindo, embora sendo apenas o primeiro passo.

Como maioria dos signatários, fica aqui expresso o sentimento de neutralidade, e, na condição de seres humanos, se declara que se as questões entre o Leste e o Oeste forem decididas de modo a conseguir o reconhecimento satisfatório de qualquer cidadão, seja comunista ou anticomunista, europeu ou asiático, branco ou negro, haveria uma solução sem a guerra. Deseja-se que isso seja plenamente entendido nos dois lados.

Perante nós, se assim optamos, haveria como contribuir para o progresso e a felicidade, o conhecimento e a sabedoria. Deveríamos, ao contrário, optar pela morte, porque não podemos esquecer nossas disputas? Apelamos como seres humanos a seres humanos: Lembrem-se de sua humanidade e esqueçam o resto. Se assim for feito, teremos aberto o caminho do Paraíso; se isso não for possível, nada restará a não ser o risco da aniquilação total.

Resolução: Convidamos esse Congresso, e, em seu nome, a todos os cientistas e ao público em geral, a endossarem a seguinte resolução:

Cientes da constatação de que em uma eventual guerra mundial armas nucleares serão certamente utilizadas, ameaçando a existência da humanidade, conclamamos os governos que aceitem, e que reconheçam publicamente, que os interesses de estados não podem ser alcançados militarmente; instamos, conseqüentemente, que busquem meios pacíficos para a negociação das questões em pauta.

Max Born, Percy W. Bridgman, Albert Einstein, Leopold Infeld, Frederic Joliot-Curie, Herman J. Muller, Linus Pauling, Cecil F. Powell, Joseph Rotblat, Bertrand Russell, Hideki Yukawa

Notas de roda-pé:

1. O professor Joliot-Curie deseja acrescentar as seguintes palavras: "como possibilidades para eliminar diferenças entre Estados"

2. O professor Joliot-Curie deseja acrescentar que essas limitações devem ser aceitas por todas as partes e que sejam do interesse de todos.

3. O professor Muller faz a observação cautelosa de que isso seja interpretado como "uma concomitante e balanceada redução de todas as armas."

guerra total, a Terra pode se tornar tão radioativa que nações inteiras poderão ser destruídas. Muitos homens e mulheres de países neutros morrerão... As nações independentes, congregadas, deveriam considerar a renúncia voluntária da força como último recurso político. Se elas não estão preparadas para isso, elas deixarão de existir.

Finalmente, devem ser registrados a inexistência de qualquer assinatura de cientistas soviéticos no Manifesto e o número pequeno de norte-americanos. Contribuíram certamente para isso as tensões da Guerra Fria na União Soviética e a campanha anti-comunista do senador Joseph McCarthy, nos Estados Unidos.

## A divulgação do Manifesto

Na sua autobiografia, Russell demonstra a atenção que dispensou à divulgação do Manifesto: *Para mim, deveria ser feita uma cobertura dramática para focalizar a atenção sobre o que a declaração pretendia informar e sobre a*

*estatura daqueles que iriam endossá-la. Após descartar várias propostas, decidi recorrer a assessores profissionais. Eu tinha tido a oportunidade de conhecer o editor do Observer, e senti que ele tinha uma posição liberal e*

*acolhedora. Ele demonstrou possuir mais que esses dois atributos, tomando a iniciativa de convocar colegas para apreciar a proposta<sup>30</sup>. Eles concordaram que algo especial deveria ser tentado além de simplesmente publicar que a declaração tinha assinaturas de eminentes cientistas de várias ideologias. Foram eles que sugeriram o encontro com a imprensa internacional para levar o Manifesto ao grande público. Esses profissionais foram mais além. Eles se organizaram para conseguir recursos para o encontro com a mídia, sob a condição de isso fosse divulgado após o evento. Foi finalmente decidido que a conferência com a imprensa seria no dia 9 de julho (de 1955). Uma sala foi reservada no Caxton Hall uma semana antes. Convites foram enviados para editores de todos jornais britânicos e corresponsais de rádio e televisão*

*estrangeiros, além da TV de Londres. O convite apenas informava que algo muito importante e de interesse mundial seria declarado. As aceitações foram em tão grande número que houve necessidade de se mudar o encontro da sala para um auditório. A semana após a conferência foi horrível. O telefone tocava todo o tempo e a sineta da porta também. Eram pessoas da imprensa e editores querendo mais informações exclusivas... Tudo isso caiu nos braços da minha esposa e de nossa empregada. Eu tinha sido aconselhado a não dar declarações e só atender telefonemas de familiares. Ninguém deveria sair de casa. Tentei ler e trabalhar sem sucesso durante toda a semana, sentado em uma cadeira. Mais tarde me informaram que eu repetia freqüentemente a seguinte frase: Isso será um foguete que falhou<sup>31</sup>.*

No encontro com a mídia, Russell necessitava da presença de alguém com conhecimentos técnicos necessários para esclarecimentos sobre a bomba H que certamente viriam da audiência. Russell decidiu que esta pessoa também

**Russell necessitava da presença de alguém com conhecimentos técnicos para esclarecimentos sobre a bomba H, e assim decidiu-se por consultar Rotblat, na época um físico jovem, mas o único assinante do manifesto que tinha trabalhado no Projeto Manhattan**

deveria presidir o ato da divulgação. Não foi fácil encontrar um físico nuclear disposto a aparecer perante uma platéia de personalidades da mídia. Finalmente, Russell decidiu-se por consultar Rotblat, na época

um físico jovem, mas o único assinante do Manifesto que tinha trabalhado no Projeto Manhattan. Rotblat aceitou a presidência do evento. Em depoimento recente, Rotblat registrou que esta sua atuação lhe permitiu testemunhar a imediata cobertura do Manifesto pela imprensa mundial. Reações contrárias foram superadas em número pelas favoráveis ao espírito do Manifesto, a maioria solicitando mais informações sobre as novas armas<sup>32</sup>.

## A primeira Conferência Pugwash

Um aspecto que diferencia o Manifesto da Declaração de Mainau é que o primeiro proponha uma ação especial: a de congregar cientistas dos dois lados da “cortina de ferro”, em plena Guerra Fria. É importante registrar que

encontros desta natureza estavam sendo propostos na época<sup>33</sup>. Em 1954, Jawaharlal Nehru, então Primeiro Ministro da Índia, propunha que cientistas organizassem uma comissão com a missão de esclarecer a opinião pública mundial sobre as conseqüências de uma guerra nuclear<sup>28</sup>. Joseph Rotblat, representando a ASA e Eugene Rabinowitch<sup>34</sup>, pela FAS, reconheceram o mérito da proposta de Nehru e iniciaram uma longa colaboração, inicialmente para organizar encontros de trabalho, com cientistas franceses. O primeiro encontro ocorreu em Londres, algumas semanas após a divulgação do Manifesto, durante os dias 3 a 5 de agosto de 1955. Foi uma reunião pequena, mas que deu a Rabinovich e a Rotblat a oportunidade de conhecerem o acadêmico Alexander Topchiev<sup>35</sup>. A história da organização da Conferência Pugwash é longa. Como mencionado na introdução, o encontro entre cientistas dos “dois lados” foi realizado somente em julho de 1957, em um remoto vilarejo canadense denominado Pugwash, graças ao apoio financeiro de doadores anônimos e, principalmente, de Cyrus Eaton, um magnata de petróleo que tinha nascido em Pugwash e que ofereceu suporte logístico e sua residência de verão para realização da conferência<sup>36</sup>.

A conferência em Pugwash reuniu 22 participantes de dez países, distribuídos entre os dois lados da “cortina de ferro”. A decisão de aceitar o convite para participar desta conferência não deve ter sido fácil para muitos. Em plena “era McCarthy”, a aceitação poderia trazer péssimas conseqüências profissionais para cientistas norte-americanos. Do lado soviético, a “licença” foi dada a um grupo pequeno, do qual participavam dois “tradutores” que anotavam todas as discussões<sup>37</sup>.

Em 2003, a 53ª Conferência Pugwash ocorreu próximo ao povoado de Pugwash, na cidade de Halifax, Canadá. Ela foi bem maior do que a primeira, com 172 participantes de 39 países. Os dilemas fundamentais, infelizmente, continuam os mesmos e bem mais complexos. A confrontação comunismo *versus* anticomunismo está sendo substituída pela disputa dos recursos

naturais do planeta. O relacionamento entre as nações sofre as conseqüências do predomínio exarcebado de interesses

financeiros sobre todos os demais. Seus efeitos se refletem até na capacidade da espécie humana de se defender das

enfermidades infecciosas, em um surpreendente regresso aos tempos das grandes epidemias<sup>38</sup>.

## Notas

<sup>1</sup>O autor agradece as informações detalhadas fornecidas graciosamente por Sandra Ionno Butcher, responsável pelo projeto “História do Movimento Pugwash” da organização *Pugwash Conferences on Science and World Affairs*.

<sup>2</sup>A bomba de hidrogênio, bomba H, difere fundamentalmente das duas bombas atômicas jogadas no Japão. Nessas últimas, a energia liberada é conseqüência da quebra (fissão) de núcleos atômicos pesados, enquanto que a liberação da energia de uma bomba de hidrogênio decorre da fusão de núcleos atômicos leves. O poder explosivo das bombas lançadas no Japão é expresso em kilotons (equivalente a 1000 toneladas do explosivo químico TNT), enquanto que aquele das bombas de hidrogênio é dado em megatons (1.000.000 toneladas de TNT).

<sup>3</sup>A carta de 15 de agosto de 1939 para o Presidente Roosevelt dos Estados Unidos continha um *memorandum* do cientista Leo Szilard, onde pode ser lido o seguinte comentário: “... O poder de destruição dessas bombas é apenas estimado grosseiramente, mas não existe qualquer dúvida de que será bem acima de qualquer projeção militar convencional”. Ver: *Heisenberg and the Nazi Atomic Bomb Project*, editado por Paul Lawrence Rose (University of California Press, Los Angeles, 1996), p. 81-105.

<sup>4</sup>Bertrand Russell, *The Bomb and Civilization. The Glasgow Forward* 39:33 (1945). In: *Bertrand Russell: His Works. Volume 22: Civilization and the Bomb, 1944-47* (Kenneth Blackwell, in progress).

<sup>5</sup>J. Rotblat, *Science and World Affairs: History of the Pugwash Conferences* (Dawsons of Pall Mall, London, 1962), p. 72.

<sup>6</sup>Joseph Rotblat conhecia o projeto da bomba de hidrogênio, tendo participado de discussões, durante sua participação do Projeto Manhattan, em Los Alamos, com membros da equipe de Edward Teller, cientista que atuou decididamente para a produção dessas bombas. Rotblat publicou um artigo sobre sua hipótese de que a bomba de hidrogênio tinha um estágio final do tipo “fissão” em 1955: *The Hydrogen-Uranium Bomb, Bulletin of the Atomic Scientists* 11, 171-2, 177 (1955).

<sup>7</sup>Nicholas Griffin, ed., *The Selected Letters of Bertrand Russell: The Public Years, 1914-1970* (Routledge, New York, 2001), p. 489.

<sup>8</sup>Carta de Bertrand Russell para Max Born de 25 de janeiro de 1955. Referida por Nicholas Griffin, ed., *The Selected Letters of Bertrand Russell: The Public Years, 1914-1970* (Routledge, New York, 2001), p. 489.

<sup>9</sup>Max Born para Albert Einstein, 28 de novembro de 1954. Mencionado em Max Born,

*The Born-Einstein Letters: Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955 with commentaries by Max Born*, traduzido para o inglês por Irene Born (Walker and Company, New York, 1971), p. 229-230. Born não sabia que o comentário de Einstein não se referia ao uso indevido da Ciência. Em carta de 17 de janeiro de 1955, Einstein informou a Born que aquele comentário se referia às contingências do trabalho científico.

<sup>10</sup>Max Born para Albert Einstein, 28 de novembro de 1954. Mencionado em Max Born, *The Born-Einstein Letters: Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955 with commentaries by Max Born*, traduzido para o inglês por Irene Born (Walker and Company, New York, 1971), p. 234.

<sup>11</sup>Maurice Goldsmith, *Frédéric Joliot-Curie: A Biography* (Lawrence and Wishart, London, 1976), p. 189-190.

<sup>12</sup>Maurice Goldsmith, *Frédéric Joliot-Curie: A Biography* (Lawrence and Wishart, London, 1976), p. 193.

<sup>13</sup>Carta de Bertrand Russell para Max Born de 25 de janeiro de 1955. Referida por Nicholas Griffin, ed. *The Selected Letters of Bertrand Russell: The Public Years, 1914-1970* (Routledge, New York, 2001), p. 489.

<sup>14</sup>Bertrand Russell, mencionado por Maurice Goldsmith, *Frédéric Joliot-Curie: A Biography* (Lawrence and Wishart, London, 1976), p. 193-194.

<sup>15</sup>John Cornwell, *Hitler's Scientists: Science, War and the Devil's Pact* (Viking, New York, 2003), p. 32-33, 57-58, 69.

<sup>16</sup>Na sua fase inicial, o influente periódico *Bulletin of the Atomic Scientists* recebeu apoio financeiro deste comitê.

<sup>17</sup>Otto Nathan and Heinz Norton, eds., *Einstein on Peace* (New York: Avenel Books, 1981), p. 303.

<sup>18</sup>Otto Nathan e Heinz Norton, eds., *Einstein on Peace* (Avenel Books, New York, 1981), p. 376.

<sup>19</sup>Bertrand Russell para Albert Einstein, February 11, 1955. Mencionada in Otto Nathan and Heinz Norden, eds., *Einstein on Peace* (Avenel Books, New York, 1981) p. 623-625.

<sup>20</sup>Ronald W. Clark, *Einstein: The Life and Times* (Avon Books, New York, 1984), p. 759.

<sup>21</sup>Albert Einstein para Bertrand Russell, February 16, 1955. Mencionada in Otto Nathan and Heinz Norden, eds., *Einstein on Peace* (Avenel Books, New York, 1981), p. 625-626.

<sup>22</sup>Leopold Infeld, físico, escreveu textos sobre a relatividade e de divulgação da ciência com Einstein.

<sup>23</sup>“Thank you for your letter of April 5. I am gladly willing to sign your excellent statement. I also agree with your choice of the prospective signatories.” Albert Einstein para Bertrand Russell, February 16, 1955. Mencionada

in Otto Nathan and Heinz Norden, eds., *Einstein on Peace* (Avenel Books, New York, 1981), p. 631.

<sup>24</sup>Bertrand Russell, *The Autobiography of Bertrand Russell, 1944-1969*, (Simon & Shuster, New York, 1969), p. 94.

<sup>25</sup>Albert Einstein para Niels Bohr, March 2, 1955. Referido em Nathan and Norton, p. 629-630.

<sup>26</sup>Bertrand Russell, *The Autobiography of Bertrand Russell: 1944-1969* (Simon and Schuster, New York, 1969), p. 94.

<sup>27</sup>Nathan & Norton, roda-pé 8, p. 680.

<sup>28</sup>Otto Hahn, recebeu o Prêmio Nobel de Química, em 1944. Sua contribuição importante foi a descoberta da fissão dos núcleos dos elementos Urânio e Tório, em 1939.

<sup>29</sup>A Declaração de Mainau é referida no texto editado por Otto Nathan e Heinz Norden, *Einstein on Peace*, (Avenel Books, New York, 1981) p. 681.

<sup>30</sup>Num depoimento durante a conferência Pugwash de 2003, da qual participou o autor desta contribuição, Joseph Rotblat observou que conheceu Kenneth Harris, o editor do *Observer* que tanto ajudou a Russell e que Harris escreveu uma página sobre sua atuação junto ao Projeto Manhattan, após o programa *BBC Panorama* de abril de 1954. Esta matéria de Harris foi uma contribuição importante para o sucesso de Rotblat na sua iniciativa posterior de dar continuidade à conferência proposta no Manifesto.

<sup>31</sup>Bertrand Russell, *The Autobiography of Bertrand Russell, 1944-1969* (Simon & Schuster, New York, 1969), p. 96-97.

<sup>32</sup>Joseph Rotblat, *Science and World Affairs: History of the Pugwash Conferences* (Dawsons of Pall Mall, London, 1962), p. 7.

<sup>33</sup>Entre as principais propostas, são reconhecidas as de Frédéric Joliot-Curie e Leopold Infeld (em reunião da *World Federation of Scientific Workers*, (WFSW), de 1951, da *Federation of American Scientists* (FAS) e da *British Atomic Scientists Association* (ASA).

<sup>34</sup>Eugene Rabinowitch, cientista norte-americano pioneiro nas aplicações dos princípios da física em processos biológicos, foi fundador e editor do *Bulletin of the Atomic Scientists*.

<sup>35</sup>Professor Alexander Topchiev, foi presidente da Academia de Ciências Soviética.

<sup>36</sup>Cyrus Eaton, empresário bem sucedido nos Estados Unidos, defendia o diálogo com a União Soviética. No mesmo ano, Eaton foi reconhecido como Empresário do Ano nos Estados Unidos e agraciado com o Prêmio Lenin da Paz da União Soviética.

<sup>37</sup>Joseph Rotblat, Reunion in Pugwash. *Pugwash News Letter*, 40:2 (2003).

<sup>38</sup>Antoine Dauchin, *Infection of Society*. *European Molecular Biology Organization Reports* 4: 333 (2003).



**O** ano miraculoso de Albert Einstein é principalmente lembrado pelas rupturas da teoria da relatividade e do “quantum de luz”. No entanto, a tese de doutoramento [1], [2], terminada em abril de 1905 e aceita pela Universidade de Zurique em julho, e o primeiro artigo sobre o movimento browniano, recebido para publicação nos *Annalen der Physik* em maio, são trabalhos de alta qualidade, que já teriam sido suficientes para estabelecer a reputação do jovem Einstein [3]. O tema desses trabalhos é o relacionamento entre o mundo microscópico das partículas (átomos, moléculas) em perene movimento e as leis visíveis do universo macroscópico da termodinâmica. Tanto na tese quanto no artigo sobre o movimento browniano há propostas para a estimativa do número de Avogadro, grandeza paradigmática do novo atomismo, equívale ao número de moléculas num mol de uma substância.

**Mesmo ignorando a ruptura causada pela teoria da relatividade, apenas a tese de doutoramento, de abril de 1905, e o artigo sobre o movimento browniano, de maio do mesmo ano, são trabalhos de tão alta qualidade que já teriam sido suficientes para estabelecer a reputação do jovem Einstein**

Todos os trabalhos de 1905 compartilham muita engenhosidade e intuição, ancoradas na realidade profunda dos sistemas físicos.

As grandes vertentes da Física no final do século XIX eram a mecânica newtoniana, aplicada a pontos materiais e meios contínuos, o eletromagnetismo maxwelliano, que havia englobado a óptica, mas que ainda não tinha se libertado do universo preenchido pelo éter, e a termodinâmica,

que se referia ao calor e a variáveis macroscópicas, “visíveis”, como a temperatura ou a pressão de um gás. As leis da termodinâmica, que impressionaram Einstein pelo seu alcance e generalidade, foram resumidas numa frase magistral de Clausius, citada inicialmente por Gibbs: “a energia do universo é constante; a entropia do universo tende a um valor máximo”. Lavoisier, que foi contemporâneo da Revolução Francesa, ainda relacionava o calórico, fluido imponderável que transita de corpos mais quentes para corpos mais frios, entre os seus “elementos”. Mas no século XIX foi aos poucos sendo abandonada a idéia do calórico; foi sendo percebido que o

calor é apenas uma forma de energia, que temperatura e calor são grandezas distintas, que a energia total (incluindo a energia mecânica) é conservada em processos e sistemas fechados. A nova função entropia, característica singular da termodinâmica, foi

introduzida por Clausius a fim de compatibilizar a idéia de conservação da energia com a teoria de Carnot sobre o rendimento das máquinas térmicas [4].

Uma das expressões típicas da termodinâmica, de caráter experimental, fenomenológico, é a “lei dos gases perfeitos”, estabelecendo que o produto da pressão pelo volume de um gás (suficientemente diluído) é função apenas da temperatura (na linguagem

.....  
**Silvio R.A. Salinas**  
Intituto de Física, Universidade de São Paulo  
e-mail: [ssalinas@if.usp.br](mailto:ssalinas@if.usp.br)  
.....

---

Apresentamos os principais ingredientes da teoria de Einstein para o movimento browniano: o balanço entre atrito viscoso e pressão osmótica, que fornece o coeficiente de difusão das partículas numa solução diluída; a dedução estatística da equação da difusão, que conduz à expressão famosa para o desvio quadrático médio das posições das partículas em suspensão, cabalmente verificada pelas experiências de Perrin.

moderna,  $pV = nRT$ , onde  $n$  é o número de moles,  $R$  é a constante universal dos gases e  $T$  a temperatura absoluta). Na segunda metade do século XIX, já era bem conhecido que essa expressão fenomenológica, independente de qualquer hipótese sobre a constituição da matéria, pode igualmente ser deduzida a partir do modelo de um gás formado por partículas microscópicas, em perene movimento, obedecendo às leis da mecânica. A pressão do gás é causada pelo impacto das partículas microscópicas nas paredes do recipiente. Maxwell foi mais adiante, propondo que as velocidades das moléculas do gás se distribuem ao acaso, de acordo com a “lei dos erros” de Gauss e Laplace; nessa teoria cinético-molecular dos gases, o calor seria a energia mecânica contida no movimento desordenado das partículas microscópicas. Nas décadas finais do século XIX, o programa de pesquisa de Ludwig Boltzmann em Viena, que Einstein estudou durante o seu período de formação, consistia na tentativa de obter a forma e o comportamento da função entropia da termodinâmica no contexto desse modelo de um gás de partículas, obedecendo às leis da mecânica clássica, e analisado com métodos da teoria das probabilidades.

No início do século XX, tanto o programa de Boltzmann quanto os resultados da teoria cinética dos gases eram vistos com suspeita, talvez como simples artifícios matemáticos, distantes da realidade dos sistemas físicos. Apesar das propostas sobre a existência do átomo químico, apesar das primeiras estimativas do número de Avogadro e de dimensões moleculares, as suspeitas persistiam. Mesmo se existissem, com os recursos da época os átomos de fato não poderiam ser observados! De acordo com os energeticistas, opositores da teoria atômica, a termodinâmica macroscópica e fenomenológica, que prescindia de qualquer modelo microscópico de constituição da matéria, seria o modelo correto de ciência. Para esses energeticistas (Wilhelm Ostwald e Ernst Mach, por exemplo, com enorme influência na física alemã; Pierre Duhem na França), a teoria cinético-

molecular do calor, baseada em entidades invisíveis, metafísicas, não deveria ter espaço na ciência.

Einstein adotou desde cedo uma visão realista, objetiva, sobre a existência de átomos e moléculas. Na sua tese de doutoramento Einstein analisa o fenômeno de difusão das partículas do soluto numa solução diluída (moléculas de açúcar em água) com o objetivo de obter estimativas para o número de Avogadro e o diâmetro das partículas do soluto. As propriedades termodinâmicas das soluções diluídas já tinham sido suficientemente estabelecidas. Sabia-se, por exemplo, que a pressão osmótica, exercida pela solução sobre uma membrana semi-permeável, impedindo a passagem do soluto, comporta-se de acordo com a lei dos gases perfeitos. Na parte inicial da tese, Einstein faz um cálculo hidrodinâmico, com base nas equações de Navier-Stokes para o escoamento de um fluido incompressível, a fim de obter a viscosidade efetiva do fluido na presença do soluto. No modelo adotado, as moléculas do soluto são esferas rígidas, não interagentes, e bem maiores do que as moléculas do solvente. O resultado final, que ainda tem um errinho e precisou ser corrigido alguns anos depois por um aluno de Einstein, é dado por

$$\eta^* = \eta(1 + \phi) \quad (1)$$

onde  $\eta^*$  é a viscosidade efetiva,  $\eta$  é a viscosidade do solvente puro, e  $\phi$  é a fração do volume total ocupado pelas partículas do soluto. Supondo que o soluto seja constituído por partículas esféricas de raio  $a$ , a fração de volume é dada por

$$\phi = \frac{4}{3} \pi a^3 N_s \frac{1}{V}, \quad (2)$$

onde  $N_s$  é o número de moléculas do soluto e  $V$  é o volume total da solução. Utilizando a densidade de massa,  $\rho$ , e a massa molar do soluto,  $m$ , que são grandezas experimentalmente acessíveis, temos

$$N_s = \frac{\rho V}{m} N_A, \quad (3)$$

onde  $N_A$  é o número de Avogadro. A partir dessas expressões, podemos escrever a relação

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \frac{\rho N_A}{m} = \frac{\eta^*}{\eta} - 1. \quad (4)$$

Já que as viscosidades podem ser medidas, que a densidade de massa e a massa molar do soluto são conhecidas, aparecem como incógnitas o raio  $a$  das partículas do soluto e o número de Avogadro  $N_A$ . Na parte final da tese, Einstein recorre a um argumento engenhoso, deduzido de forma alternativa no artigo sobre o movimento browniano, a fim de obter uma segunda relação entre  $a$  e  $N_A$ . Vamos discutir esse argumento de Einstein.

A idéia engenhosa consiste em considerar uma força  $K$  (na direção do eixo  $x$ ) atuando sobre as partículas grandes da solução (as moléculas de açúcar são muito maiores do que as moléculas de água), contidas em um volume elementar de comprimento  $\Delta x$  e seção transversal  $\Delta S$ . Para esferas rígidas de raio  $a$  e velocidade  $v$ , mergulhadas num fluido com viscosidade  $\eta$ , essa força deve ser dada pela lei (de atrito viscoso) de Stokes,

$$K = 6\pi \eta a v, \quad (5)$$

de acordo com o texto de mecânica de Kirchhoff, que Einstein estudou durante os seus anos de formação em Zurique (e que é a única referência citada no primeiro trabalho sobre a teoria do movimento browniano!) Mas as partículas se difundem pelo fluido devido ao gradiente de pressão. Então, nesse volume elementar, estariam sujeitas a uma força por unidade de volume, ao longo do mesmo eixo  $x$ , dada por

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{p(x+\Delta x) - p(x)}{\Delta x}. \quad (6)$$

Podemos agora escrever uma equação de balanço entre essas duas forças,

$$K = - \frac{m}{\rho N_A} \frac{\partial p}{\partial x} = 6\pi \eta a v, \quad (7)$$

onde  $\rho$  é a densidade de massa e  $m$  é a massa molar do soluto. Obtemos assim uma expressão para a velocidade  $v$  das partículas, que nos remete ao fluxo ao longo do eixo  $x$  (quantidade de massa das partículas atravessando a seção de área  $\Delta S$  durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ ),

$$J = \rho v = - \frac{m}{6\pi \eta a N_A} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (8)$$

Utilizando a forma (ideal) da pressão osmótica,

$$p = \frac{nRT}{V} = \frac{RT\rho}{m}, \quad (9)$$

que Einstein justificava através de

argumentos de física estatística para um sistema de partículas não interagentes, temos

$$J = -\frac{RT}{6\pi\eta a N_A} \frac{\partial p}{\partial x} = -D \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (10)$$

de onde vem

$$D = \frac{RT}{6\pi\eta a N_A}, \quad (11)$$

que é uma das expressões conhecidas de Einstein, relacionando o coeficiente de difusão  $D$ , experimentalmente acessível, com a temperatura e a viscosidade do fluido. Temos então duas relações independentes para a determinação do raio  $a$  das moléculas e do número de Avogadro  $N_A$ .

A partir das expressões (4) e (11), com os dados disponíveis na época para soluções de açúcar em água, Einstein obteve  $N_A = 2,1 \times 10^{23}$  (partículas por mol) e  $a = 9,9 \times 10^{-8}$  cm, concluindo que “o valor encontrado para  $N_A$  apresenta uma concordância satisfatória, em ordem de magnitude, com os valores encontrados para essa grandeza por outros métodos”. Mais tarde, com dados experimentais um pouco melhores, o valor do número de Avogadro foi modificado para  $N_A = 3,3 \times 10^{23}$ . Na época, diversos trabalhos dessa mesma natureza, produzindo estimativas para o número de Avogadro e as dimensões moleculares, foram aos poucos impondo a realidade de átomos e moléculas. Graças à concordância dos valores obtidos com base em técnicas e idéias distintas, as resistências ao atomismo foram sendo vencidas [3].

O trabalho sobre as leis que governam o movimento browniano e a sua brilhante confirmação experimental por Perrin e colaboradores alguns anos depois foram decisivos para a aceitação da realidade de átomos e moléculas [5]. Em dois artigos anteriores a 1905, Einstein já tinha utilizado a definição estatística de entropia, que ele chamava “princípio de Boltzmann”, para estudar as flutuações de energia de um sistema em contato térmico com outro sistema muito maior (com um reservatório térmico, na linguagem moderna). A energia do sistema de interesse flutua em torno de um valor médio, que pode ser identificado com a energia interna termodinâmica. Sem conhecimento de trabalhos anteriores de Gibbs, Einstein mostrou que o valor

médio do desvio quadrático da energia depende do número de partículas microscópicas; no caso de um fluido, o desvio relativo torna-se absurdamente pequeno, sem nenhuma chance de ser observado. No movimento browniano, no entanto, Einstein vislumbrava uma oportunidade de observar flutuações dessa mesma natureza. Nesse fenômeno, partículas macroscopicamente pequenas em suspensão, mas muito maiores que as moléculas do fluido puro, estão descrevendo um movimento incessante, errático, de vai-e-vem, que podia ser observado (e poderia ser medido) nos ultramicroscópios da época. Esse comportamento foi caracterizado pelo botânico escocês Robert Brown, na primeira metade do século XIX, que observou o movimento incessante de partículas de pólen dissolvidas em água. O mesmo tipo de movimento também foi observado em partículas inorgânicas de cinza, convencendo Brown sobre a natureza física do fenômeno. Ao contrário das flutuações invisíveis das moléculas de um gás, no movimento browniano tornam-se visíveis no microscópio as flutuações das partículas bem maiores em suspensão, incessantemente bombardeadas pelas partículas microscopicamente menores do solvente fluido.

Na introdução do seu artigo de 1905, Einstein escreve que “corpos de tamanho visível ao microscópio, e que estão em suspensão em um líquido, devem executar, como consequência dos movimentos térmicos moleculares, movimentos de tal magnitude que podem ser facilmente observáveis com a utilização de um microscópio”. Nesse primeiro artigo, Einstein dispõe de poucos dados experimentais e ainda tem dúvidas, que seriam depois superadas, sobre a real aplicação da sua teoria ao “movimento molecular browniano” [1]. Os argumentos de Einstein baseiam-se na semelhança entre o comportamento de soluções e de suspensões diluídas. Os cálculos da tese, para uma solução (diluída) de açúcar em água, são transpostos para as partículas brownianas em suspensão (em particular, a relação entre o coeficiente de difusão e a viscosidade). Além disso, antecipando-se às teorias modernas de cadeias markovianas, Einstein

apresenta uma dedução probabilística da equação da difusão e obtém uma expressão para o “deslocamento característico” das partículas em suspensão.

A equação da difusão, conhecida desde o início do século XIX, é usualmente obtida a partir da equação de continuidade, ou equação diferencial para a conservação da massa, dada por

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \vec{J}, \quad (12)$$

com a suposição adicional de que o fluxo  $\vec{J}$  seja linearmente dependente do gradiente da densidade, isto é, que  $\vec{J} = -D \vec{\nabla} \rho$ , onde  $D$  é o coeficiente de difusão. Temos assim a equação da difusão,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \vec{\nabla}^2 \rho, \quad (13)$$

cujas versão unidimensional, ao longo do eixo  $x$ , é dada por

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2}. \quad (14)$$

A dedução probabilística de Einstein parte da idéia de que as partículas estejam executando movimentos independentes, e de que os movimentos da mesma partícula em diferentes intervalos de tempo também sejam processos mutuamente independentes (em intervalos de tempo pequenos, mas suficientemente grandes para dar margem a observações). Vamos supor que uma partícula em suspensão tenha uma certa probabilidade de realizar um deslocamento  $\Delta$ , que pode ser positivo ou negativo, para a direita ou para a esquerda, durante um intervalo de tempo  $\tau$ . De forma um pouco mais precisa, seja  $p(\Delta)d\Delta$  a probabilidade da partícula se deslocar entre  $\Delta$  e  $\Delta + d\Delta$  no intervalo de tempo  $\tau$ . A densidade de probabilidade deve ser simétrica,

$$p(\Delta) = p(-\Delta), \quad (15)$$

e normalizada,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(\Delta)d\Delta = 1. \quad (16)$$

Então, por “puro bom senso”, se  $n = n(x, t)$  for o número de partículas por unidade de volume no instante de tempo  $t$ , devemos ter a relação probabilística

$$n(x, t + \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} n(x + \Delta, t)p(\Delta)d\Delta. \quad (17)$$

Como  $\tau$  e  $\Delta$  são macroscopicamente pequenos, podemos escrever as

expansões

$$n(x, t + \tau) = n(x, t) + \frac{\partial n}{\partial t} \tau + \dots \quad (18)$$

e

$$n(x + \Delta, t) = n(x, t) + \frac{\partial n}{\partial x} \Delta + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \Delta^2 + \dots \quad (19)$$

Vamos agora inserir essas expansões na Eq. (17). Levando em conta as propriedades de  $p(\Delta)$ , e retendo apenas termos de ordem dominante, obtemos a equação da difusão,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (20)$$

com o coeficiente de difusão dado por

$$D = \frac{1}{2\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 p(\Delta) d\Delta \quad (21)$$

Então,

$$\langle \Delta^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 p(\Delta) d\Delta = 2D\tau \quad (22)$$

mostrando que o desvio quadrático médio do deslocamento é proporcional ao coeficiente de difusão.

Nesse ponto Einstein argumenta que os movimentos das diversas partículas são independentes e que, portanto, a origem das coordenadas não deve ter nenhum significado. Então, a função  $n(x, t)$ , devidamente normalizada,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} n(x, t) dx = N_0 \quad (23)$$

representa a densidade de partículas cujas posições sofreram um acréscimo  $x$  entre o instante inicial e o instante de tempo  $t$ . Einstein também aponta que a solução da equação da difusão (20) é dada pela forma gaussiana

$$n(x, t) = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \quad (24)$$

Então, com essa interpretação de  $n(x, t)$ , obtemos o deslocamento quadrático médio,

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 n(x, t) dx = 2Dt = \frac{RT}{3\pi\eta a N_A} t \quad (25)$$

que é uma das mais celebradas expressões de Einstein, fornecendo indicação precisa sobre as grandezas a serem medidas experimentalmente. O deslocamento característico, dado por  $\sqrt{\langle x^2 \rangle}$ , cresce com  $\sqrt{t}$ , afastando-se das formas balísticas usuais, pois os deslocamentos individuais são aleatórios, “podendo ocorrer tanto para a direita quanto para

a esquerda”. Para partículas de um micron de diâmetro, em suspensão na água a temperatura ambiente, Einstein estimou um deslocamento característico da ordem de 6 microns em um minuto (ou seja, valores perfeitamente passíveis de observação).

Há uma conexão direta entre esse raciocínio probabilístico de Einstein e o problema do passeio aleatório em uma dimensão, usualmente explorado nos textos modernos de física estatística [7],[8]. Vamos considerar um caminhante que se desloca ao longo do eixo  $x$ , em intervalos de tempo iguais, dando passos de comprimento aleatório. O  $j$ -ésimo passo tem comprimento  $\Delta_j$ , ocorrendo com probabilidade  $p(\Delta) d\Delta_j$ , em que a distribuição  $p(\Delta)$  é simétrica e normalizada (Eqs. 15 e 16). No instante de tempo  $t = N\tau$  (isto é, depois de  $N$  passos), o caminhante deve estar na posição  $x = \sum_{j=1}^N \Delta_j$ . Como os passos são independentes e  $\langle \Delta_j \rangle = 0$ , o valor médio do deslocamento é nulo,  $\langle x \rangle = 0$ , mas o valor quadrático médio é proporcional ao número de passos,  $\langle x^2 \rangle = N \langle \Delta^2 \rangle = (t/\tau) \langle \Delta^2 \rangle$ . Utilizando a expressão  $\langle \Delta^2 \rangle = 2D\tau$ , dada por (22), recuperamos o resultado famoso de Einstein,  $\langle x^2 \rangle = 2Dt$ .

Foi muito importante que Einstein indicasse claramente a grandeza que deveria ser medida nas investigações sobre o movimento browniano (isto é, distâncias ao invés de velocidades). As experiências de Perrin e colaboradores [5] consistiram em registrar a observação, no microscópio, do movimento de um conjunto grande de partículas em suspensão, cuja forma esférica podia ser muito bem controlada. Nas suspensões utilizadas, essas experiências verificaram o comportamento ideal da pressão osmótica e a lei de força de Stokes, ingredientes importantes da teoria de Einstein. Além disso, produziram nova estimativa para o número de Avogadro. O sucesso dos trabalhos de Perrin foi notável. Os valores obtidos e a concordância com a teoria de Einstein representaram contribuição significativa para a aceitação geral do atomismo.

Uma equação diferencial para o movimento browniano foi escrita por Langevin [6] em 1908, recuperando a relação de Einstein e fazendo contacto com trabalhos paralelos de Smolu-

chowski. A moderna equação diferencial estocástica associada à “dinâmica de Langevin” tem sido fartamente utilizada a fim de introduzir um comportamento dinâmico no contexto de sistemas estatísticos clássicos [7],[8]. Há um número crescente de aplicações contemporâneas, em vários problemas em que as flutuações desempenham papel relevante. Um mecanismo de Langevin, na presença de potencial adequado, foi proposto para explicar o funcionamento dos motores moleculares, reponsáveis pelo metabolismo biológico. Torna-se irônico que durante boa parte do século XX a interpretação estatística da física clássica, cabalmente confirmada pela teoria do movimento browniano, tenha ficado em segundo plano frente ao sucesso da física estatística quântica. Nesse início de século, no entanto, as aplicações e a ubiquidade das flutuações estatísticas e dos seus efeitos, particularmente em problemas de biologia ou da “física da matéria mole”, incluindo colóides, suspensões, misturas liotrópicas, polímeros, espumas, materias granulares, estão dando vida nova às aplicações da teoria do movimento browniano.

## Referências

- [1] J. Stachel, *O Ano Miraculoso de Albert Einstein: Cinco Artigos que Mudaram a Face da Física* (Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 2001), tradução de A.C. Tort. Este livro contém os quatro artigos originais de 1905 e a tese de Einstein.
- [2] A. Einstein, *Investigations on the Theory of the Brownian Movement* (Dover Publications, New York, 1956), texto editado, com notas, por R. Fürth.
- [3] A. Pais, *Sutil é o Senhor ... A ciência e a vida de Albert Einstein* (Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995). Excelente biografia científica de Einstein.
- [4] L. Tisza, *Generalized Thermodynamics* (The MIT Press, Boston, 1966), ver especialmente os capítulos 1 e 2.
- [5] J. Perrin, *Les Atomes* (Flammarion, Paris, 1991), publicado a partir do texto original de 1913, com uma introdução de Pierre-Gilles de Gennes.
- [6] P. Langevin, Sur la théorie du mouvement brownian. *Comptes Rendues Acad. Sci.* **146**, 530 (1908).
- [7] S.R.A. Salinas, *Introdução à Física Estatística* (EDUSP, São Paulo, 1997), ver o capítulo 16.
- [8] T. Tomé e M.J. de Oliveira, *Dinâmica Estocástica e Irreversibilidade* (EDUSP, São Paulo, 2001).



## De Corpo Inteiro e Viva, a Física

**N**otícia recente de jornal diário [1] relatou novas descobertas envolvendo os dicinodontes, répteis herbívoros de porte médio precursores dos mamíferos. Alguns desses achados são fósseis de duzentos e tantos milhões de anos, encontrados no sul do Brasil, que não são ossadas inteiras do animal, nem sequer de um par de ossos, mas sim coprólitos, ou seja, fezes petrificadas desses bichos ancestrais. Uma foto em tamanho grande, que ilustrava a reportagem, mostrava um excremento que foi pisado pelo animal, ou seja, para alegria dos pesquisadores as fezes estavam marcadas com as pegadas do saúrio. É dura a vida dos arqueólogos: têm de se contentar com cada coisa...

Por outro lado, é bem mais confortável ensinar Física do que investigar fósseis, principalmente quando se faz uso do privilégio de se lidar com uma ciência vivamente presente em nosso cotidiano e com ramificações e interfaces em todas as áreas do conhecimento. Fecho a página do jornal com a “pisada” do saúrio e me imponho o desafio de, sem me levantar da cadeira em que estou sentado, mostrar a Física de corpo inteiro, e viva. Começo a investigação, observando sobre minha mesa de trabalho, iluminada por lâmpadas fluorescentes, um velho ventilador, um pequeno relógio e um telefone celular ligado a seu carregador. À minha frente, o monitor de um computador pessoal mostra as palavras que digito, enquanto ouço uma seleção de velhos chorinhos, de um CD reproduzido com auxílio da mesma unidade de processamento que registra este texto que estou digitando, como mostra a foto feita por meu amigo Marcelo

Bonetti [2]. Pela janela chega o ruído de um *automóvel* sendo estacionado junto ao prédio, próximo do meu, que tem tido problemas para “pegar” pela manhã. Fico, por enquanto, com esta dezena de equipamentos e faço, a seguir, seu “desmonte conceitual”.

As lâmpadas fluorescentes, cilindros de vidro com pares de terminais elétricos em seus extremos, estão ligadas a transformadores, ou seja, diferentes bobinas de fio de cobre enroladas em torno de um mesmo núcleo de ferro, que fornecem inicialmente uma tensão alta para ionizar o gás do interior, e depois uma tensão mais baixa, para acelerar elétrons e íons ao longo do cilindro. A colisão entre estes produz radiação ultravioleta, não visível, que ao atingir sais fluorescentes que recobrem o vidro produzem uma cascata de radiação de diferentes frequências cuja somatória resulta na cor branca dessas lâmpadas, chamada luz fria por conter bem menos infravermelho que a emitida pelos filamentos das lâmpadas incandescentes.

Tanto o ventilador quanto o relógio são sistemas motores, ou seja, produzem um movimento mecânico a

.....  
**Luis Carlos de Menezes**  
Instituto de Física da Universidade de São Paulo  
e-mail: menezes@if.usp.br  
.....



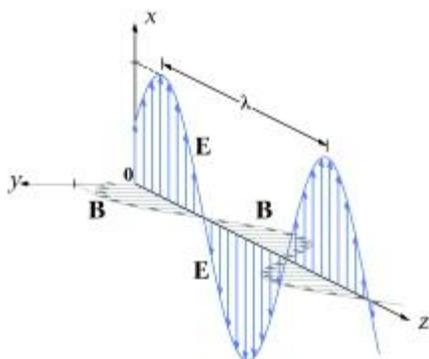
Um coprólito do período Jurássico, com cerca de 150 milhões de anos.



A Física está presente a cada momento, do nosso dia-a-dia; basta saber enxergá-la nos mais banais acontecimentos e situações. Desempenhando tal habilidade, o professor certamente poderá passar aos alunos a percepção não limita-se a apenas um amontoado de equações que devem ser decoradas.

partir de correntes elétricas. Um *motor de indução* faz operar o ventilador, ou seja, a corrente de um circuito primário induz corrente em um outro, preso ao eixo onde estão fixas as pás, que gira devido ao torque magnético entre ambos. No *relógio*, o ponteiro dos segundos é acionado por um pequeno ímã permanente, que gira à passagem de um pulso elétrico, em intervalos múltiplos do período de oscilação de um cristal de quartzo, que faz o papel do pêndulo dos antigos relógios de mesa.

O *carregador* é um *transformador* semelhante ao das lâmpadas, mas acoplado a um *retificador*, que é essencialmente um *diodo semicondutor*, compondo assim um dispositivo que toma corrente alternada a uma certa tensão e fornece corrente contínua a outra tensão, para recarregar energia na bateria do celular. Esse telefone é, na realidade, uma emissora de rádio portátil, ou seja, um *circuito oscilante* composto de um capacitor e de uma bobina, que oscila em uma radiofrequência portadora, que é estabelecida pela operadora de telefonia móvel, que espalha em nossas cidades antenas das estações repetidoras de sinal, três delas visíveis no meu trajeto diário de casa para a universidade. Além dos circuitos oscilantes, os telefones celulares também são dotados de dois *conversores eletromecânicos*: o microfone, que transforma a vibração sonora em um sinal elétrico com frequência de áudio, que modulará a portadora na emissão, e o falante, que transforma em som a frequência de áudio filtrada da portadora na recepção. Nos velhos



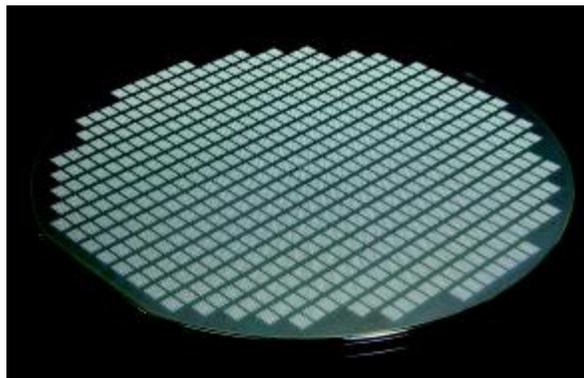
Ondas eletromagnéticas provenientes de celulares e outros equipamentos preenchem constantemente todo o espaço à nossa volta.

telefones esses conversores eram sempre eletromagnéticos; hoje há muitas variações.

Um *monitor do computador* tem alguns aspectos em comum com uma *lâmpada fluorescente*, como ser cruzado por elétrons e ter um vidro coberto por substâncias opticamente ativas que recobrem a tela. No entanto, no monitor, cada substância atingida pelo feixe de elétrons é responsável por uma das três cores fundamentais: azul, verde e vermelho; os três feixes de elétrons, cada qual com sua intensidade variável, percorrem a tela reproduzindo as proporções das cores na imagem que vemos. Os elétrons dos feixes são acelerados no “pescoço” do tubo e em seguida direcionados por eletromagnetos. A produção da imagem se dá como em tubos de TV, com o padrão de varredura da tela pelos feixes, estabelecido em convenção internacional.

Os *CDs e DVDs* são registros de informações de som, de texto ou de imagem, na forma de dígitos (cifras) que são lidos por um equipamento periférico do computador, e em seguida processados para resultar em textos, sons e imagens. Uma música, por exemplo, é uma seqüência de frequências de várias intensidades, que podem ser representadas por cifras, de acordo com um código convencional. Os discos têm uma trilha espelhada, com profundidade variável, na qual um feixe de *luz laser* é refletido para recuperar os valores registrados em cada ponto da trilha, para depois serem convertidos em sinal elétrico, que informará ao processador os dados codificados do texto, som ou imagem. É essencial que se utilize *laser*, ou seja, luz colimada, monocromática e em fase, caso contrário a falta de coerência impediria a leitura desses dados.

Um pouco mais complexa é a descrição física, mesmo em termos gerais, dos componentes que permitem a operação da *unidade central de processamento* do computador capaz de, ao mesmo tempo, registrar este



Os semicondutores são empregados nos equipamentos do nosso cotidiano: computadores, rádios, celulares, televisões etc.

texto que está sendo escrito, reproduzir a música gravada no *CD* ou receber mensagens multimídia que chegam a todo instante pela Internet, que conecta este computador a centenas de milhões de outros em todo o mundo. Na realidade, com a miniaturização que hoje é possível, até mesmo muitos *telefones celulares* podem desempenhar estas funções de registro e transmissão de informações escritas e audiovisuais.

É mais fácil compreender, primeiro, como são feitos os registros, de números, letras, sons ou imagens. Eles são convertidos em dígitos e traduzidos ao sistema binário, ou seja, a uma seqüência de zeros e uns. Um arranjo de células semicondutoras microscópicas, que quando carregadas expressam o um e quando descarregadas expressam o zero, permite guardar um número descomunal de informações em um único pequeno cristal. Já o processamento dessas informações é realizado por meio de interligações entre essas células, condicionadas por ordens eletrônicas que definirão se os registros serão mantidos ou não, e de que forma serão modificados, ou seja, quais células manterão suas cargas, quais serão carregadas e quais descarregadas.

Um único monocristal semicondutor, “dopado” com substâncias que mudam localmente as propriedades elétricas, possui uma notável arquitetura de muitos pavimentos ou camadas, de forma a conseguir abrigar centenas de milhares de componentes, como relês, capacitores, diodos e transistores interligados. Designados

genericamente como *chips*, estes cristais servem a uma grande variedade de equipamentos, de relógios de pulso a máquinas de lavar roupas, de computadores a sistemas de monitoramento por satélite. Esta base física dos *chips* é o chamado *hardware* da informática, enquanto os procedimentos e as linguagens com que se definem funções, tarefas e objetivos dos sistemas é dito *software* da informática.

Aproxima-se a hora do intervalo para o almoço, e vou aproveitar para levar meu carro para uma oficina de conserto. Acredito que o problema não esteja na bateria, nem no motor de partida, pois este funciona quando aciono a chave de contato. Portanto, suponho que o problema esteja na injeção de combustível ou na carburação. Também os automóveis foram muito alterados pela tecnologia dos semicondutores, especialmente em sua injeção eletrônica e sistemas de controle. Eles continuam sendo movidos pela mesma *máquina térmica*, o já secular *ciclo Otto*, em que a mistura de ar e combustível é aspirada, comprimida e detonada, de forma que os gases de combustão se expandam realizando trabalho e depois sejam expelidos. Isso é mais ou menos assim há um século, mas, diante de problema semelhante ao de hoje, há alguns anos, eu abriria a tampa do distribuidor para verificar eventual platinado sujo que pudesse estar interrompendo o pulso elétrico que produz a faísca para a explosão da mistura combustível, mas hoje um *chip* controla a emissão de corrente para as velas de ignição.

Voltei da oficina mecânica com a confirmação de que o problema estava no sistema de injeção e, antes de retomar a escrita deste artigo, reli as páginas anteriores, para ver se mostravam, como eu pretendia, a difusa presença da Física em nossa vida diária. De fato, passamos por muitos processos eletromagnéticos, ópticos e termodinâmicos, com aspectos nem sempre explicitados, como a dinâmica dos elétrons no interior do tubo de imagem do monitor, ou como o caráter quântico das operações dos *semicondutores* e *lasers*, que podem ser

respectivamente compreendidos a partir da estatística quântica de elétrons, que são férmions que “se excluem”, e pela estatística quântica dos fótons, que são bósons que “se juntam”. Enfim, não precisei levantar de minha cadeira para identificar toda uma variedade de conceitos físicos, essenciais para a construção e para a compreensão de equipamentos e sistemas de sentido prático.

Investigo mais uma vez a sala, para conferir de que outras formas a Física se apresenta à minha volta, e me ocorre algo que a princípio parecerá ter caráter meramente geométrico, que é a multiplicidade de retângulos em minha sala; são retangulares as paredes, as janelas, as portas, as estantes, as estruturas das mesas, os quadros de avisos, até mesmo as molduras dos retratos de Galileu Galilei e de Mário Schenberg. Esses retângulos não são mera opção estética, mas sim uma sucessão de linhas de prumo e linhas de nível, orientadas pela gravitação local. A porta da estante fora de prumo, que não pára fechada, revela a ação do torque gravitacional e, com isto, já “decifra” a razão de tantos retângulos. Também é o campo gravitacional o responsável pela verticalidade dos postes e das árvores que vejo pela janela, assim como a disputa entre o empuxo nas correntes de ar ascendentes e o peso das nuvens negras, que ameaçam desabar em uma tardia tempestade de abril.

Toca meu celular; o mecânico me informa que já reparou a bomba de gasolina do carro, e o chamado me traz à consciência de quanto minha sala é invadida por ondas e campos eletromagnéticos, bem mais diversificados e dinâmicos que o constante e uniforme *campo gravitacional* junto à superfície terrestre, que tem a ver com aqueles retângulos... Penso então nos muitos usos de todo o tipo de radiação a que tenho sido exposto, voluntariamente ou não: pergunto-me se o concreto da laje, sob o piso da sala, de fato me protege dos raios X do laboratório de cristalografia que funciona no piso inferior, e apalpo meu joelho direito, ainda convescente após uma artroscopia monitorada por computador, de uma lesão de menisco diagnosticada há dois

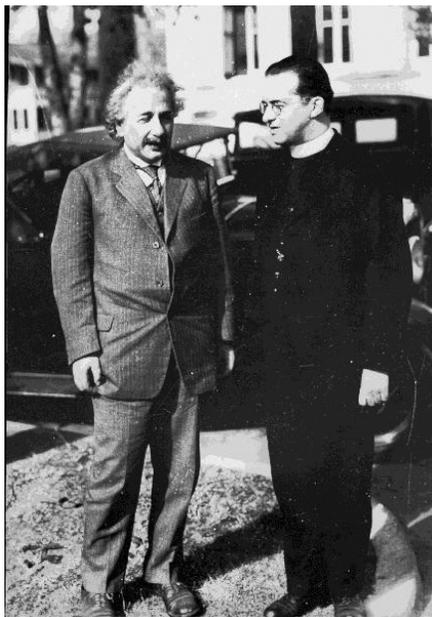
meses por uma ressonância nuclear magnética, que mapeia o magnetismo dos núcleos integrantes das moléculas de água na parte do organismo sendo investigada.

Não consegui terminar este artigo naquela mesma semana, como pretendia, por conta de sucessivas viagens para participar de palestras, primeiro no Sul e em seguida no Norte do Brasil, especialmente por conta de ser este o Ano Mundial da Física, que festeja o centenário do ano maravilhoso de 1905, em que Einstein interpretou o caráter quântico do efeito foto-elétrico, apontou a origem atômica do movimento browniano e alterou as bases da mecânica newtoniana para compatibilizar as leis da mecânica com processos “da eletrodinâmica dos corpos em movimento”, que é como se chamava seu famoso artigo em que lançou as bases da relatividade especial.

Por falar em Einstein, o mesmo jornal da matéria sobre os coprólitos trouxe ontem um caderno especial sobre cogitações fantásticas que, se não forem reais, pelo menos são um prato cheio para a ficção científica [3]. Em síntese, afirma que não precisamos perder as esperanças na eternidade, no caso de eventual morte térmica desse nosso universo, que dá evidências de estar se expandindo aceleradamente por alguma razão pouco compreendida, e por isso chamada de energia escura. Daqui a vários bilhões de anos, quando o esfriamento universal tornar inviável a vida de uma civilização avançada – que, aliás, já terá escapado da incandescência o sistema solar, quando nossa estrela tiver inchado em uma gigante vermelha – ela



O raio laser possui uma enorme gama de aplicações, como leitores de CDs e DVDs, comunicações e medicina.



Einstein e Lemaître. O primeiro acabou por perceber a importância da proposta do abade, mesmo que inicialmente a tenha recebido com ceticismo.

simplesmente escapar, ou enviará sementes suas, para outros universos paralelos, através de “buracos de minhoca”, portais às vezes denominados de “pontes Einstein-Rosen”.

Faltaria aqui espaço e conhecimento de cosmologia para desenvolver mais essas hipóteses fabulosas, mas posso lembrar de onde surgiu a idéia de um universo em expansão e de universos paralelos. Uma década e meia após aquele ano maravilhoso, foi o próprio Einstein quem deu margem à formulação de equações do universo, com sua relatividade geral onde a matéria dá forma ao espaço-tempo.



Concepção artística de uma ponte Einstein-Rosen. Esses “buracos de minhoca” em princípio poderiam ligar dois pontos do nosso universo ou nosso universo a outro.

Pouco depois, George Lemaître, um abade matemático, “tirou” daquelas equações um universo em contínua expansão e o astrônomo Edwin Hubble verificou que, de fato, galáxias distantes estão se afastando rapidamente. Duas décadas depois, George Gamov mostrou que, há bilhões de anos, o universo era uma bola radiante e, vinte anos adiante, esta “radiação de fundo” foi detectada e o modelo do *big bang* se tornou a hipótese mais aceita para a evolução do cosmo (aliás, dentre as importantes contribuições de Gamov, à astrofísica, há também trabalhos feitos junto com o brasileiro Mário Schemberg). Como as contas não davam certo para o “início dos tem-

pos”, Allan Guth propôs que nosso universo surgiu da “inflação” de um dos grãos de uma entidade múltipla primitiva, da qual outros grãos teriam evoluído em universos independentes deste “nosso”. Por fim, nesse cenário de rica imaginação, poderíamos quem sabe ir pulando de um universo para outro, para garantir a vida eterna, amém.

Diferentes pesquisadores professam diferentes convicções sobre as origens e destinos deste mundo e até de outros, mas é inegável que hoje não é mais possível filosofar sobre a vida e o universo sem levar em conta suas cogitações. Portanto, a Física não está somente presente nas tecnologias de nosso cotidiano ou nas fronteiras da terceira revolução industrial e, portanto, na economia; ela é hoje essencial também para todo o pensamento humano. Por falar nisso, na página seguinte à da matéria sobre a “fuga do universo”, há uma outra tratando da relação entre a finitude do universo, no tempo e no espaço e a origem da vida [4]. Mostra-se que o universo ter “somente” cerca de catorze bilhões de anos e

**Diferentes pesquisadores professam diferentes convicções sobre as origens e destinos deste mundo e até de outros, mas é inegável que hoje não é mais possível filosofar sobre a vida e o universo sem levar em conta suas cogitações**

a vida ter cerca de quatro bilhões de anos não são fatos independentes, pois se ele fosse infinitamente velho a vida deveria estar presente em todos os graus de desenvolvimento, e isto também depende do conhecido ciclo de evolução e morte das estrelas, que sintetizam os elementos para a vida.

Pois bem, não é só o universo que tem um tempo finito, e eu também não posso adiar indefinidamente a entrega deste artigo ao Nelson Studart, editor desta Revista. Já visitamos desde

equipamentos de uso diário até viagens ao início dos tempos, com a Física viva e de corpo inteiro, ao nosso lado. Começamos, aliás, falando dos pobres arqueólogos, que festejam a descoberta de excrementos pisados há muitos

milhões de anos, e poderíamos acrescentar uma pergunta: como poderiam aqueles especialistas determinar idades de centenas de milhões de anos se não pudessem contar com métodos de datação baseados na determinação de proporções isotópicas de elementos radiativos, desenvolvidos pela física nuclear?

Claro que não nos causam pena, mas sim admiração, os notáveis arqueólogos que fazem descobertas formidáveis com tão poucas evidências; o que dá pena são alguns professores de Física que, ignorando a ampla presença desta ciência em nosso mundo e em nossa compreensão do mundo, continuam ensinando uma “língua morta”, da qual só interessa sua gramática expressa em uma dúzia de equações, já que ninguém fala mesmo...

## Notas

- [1] Folha de São Paulo, página de Ciência, 13 de abril de 2005.
- [2] Marcelo de Carvalho Bonetti, físico e educador, além da foto fez vários comentários, que já foram incorporados a este texto.
- [3] Folha de São Paulo, “Caderno Mais!”, 1.º de maio de 2005, com o tema de capa “Fuga do Universo”.
- [4] No mesmo caderno, jornal e data citados a matéria de Marcelo Gleiser se intitula “O cosmo e a vida”.



**N**esse ano de 2005, decretado o Ano Mundial da Física, celebramos o centenário do ano miraculoso de 1905, quando um então desconhecido físico de apenas 26 anos chamado Albert Einstein publicou seus trabalhos que tiveram um profundo impacto no futuro desenvolvimento da Física. Em seu *annus mirabilis*, Einstein mostrou que massa é equivalente a energia, luz é feita de partículas e moléculas são uma realidade. Sua carreira decolou a partir daí, culminando com o desenvolvimento de sua teoria da gravitação, denominada relatividade geral, onde o espaço é encurvado pela presença de matéria e as partí-

culas seguem trajetórias nesse espaço curvo. Essa teoria foi confirmada no eclipse solar de 1919, com a análise de fotografias tomadas por 2 expedições britânicas, uma delas a Sobral, no Ceará. Tornou-se uma figura tão influente que foi eleito a personalidade do século XX pela revista Time. A teoria da relatividade geral é a base de um modelo para descrever o universo como um todo, denominado Modelo Cosmológico Padrão, que será o tema central desse artigo.

### O que é cosmologia?

Ao olhar o céu em uma noite sem nuvens e longe das luzes da cidade, é inevitável a sensação de vastidão do cosmos. Inúmeras luzinhas, que hoje sabemos ser estrelas distantes, pon-

tuam o firmamento. Ao observar mais atentamente, percebemos uma faixa leitosa que atravessa o céu. Essa faixa nada mais é que a nossa galáxia, a Via Láctea. Ela tem uma forma achatada como uma “panqueca”, com as estrelas distribuídas em braços espirais (ver Box 1). Ela contém dezenas de bilhões de estrelas, nosso Sol sendo apenas uma delas, localizado em um dos braços a uma distância do centro

**Cosmologia é a Ciência que estuda a estrutura, evolução e composição do universo. Ciência é o método científico para criar e testar modelos; estrutura é o problema da forma e da organização da matéria no universo; evolução são as diferentes fases pelas quais o universo passou; composição é daquilo que é feito o universo**

da galáxia correspondente a aproximadamente 2/3 do seu raio. Quando olhamos perpendicularmente ao plano de nossa galáxia, para cima ou para baixo da panqueca, não vemos tantas estrelas. A faixa leitosa no nosso céu nada mais é que a projeção de um grande número de estrelas na direção do plano galático. Tal concentração de estrelas não permite a identificação individual delas, resultando na aparência leitosa que dá origem ao nome de nossa galáxia, que é apenas uma entre as bilhões de galáxias que existem no nosso universo. Mas, afinal, o que vem a ser cosmologia?

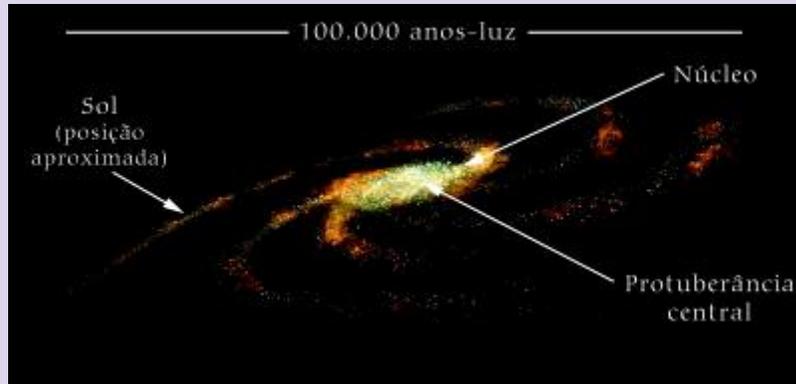
Cosmologia é a Ciência que estuda a estrutura, evolução e composição do universo. Por Ciência, nos referimos ao uso do método científico para criar e testar modelos; por estrutura, entendase o problema da forma e da organização da matéria no universo; por evolução, as diferentes fases pelas quais o universo passou; por composição, veremos saber do que é feito o universo.

.....  
**Rogério Rosenfeld**  
Instituto de Física Teórica, UNESP  
e-mail: rosenfel@ift.unesp.br  
.....

---

Várias questões sobre nosso Universo têm instigado a mente de muitas pessoas por muito tempo. Do que é feito o Universo? Ele é finito ou infinito? Ele terá um fim? Ele teve um início? Estamos vivendo uma época excitante com novos dados observacionais revelando surpresas sobre o nosso Universo, onde essas questões estão começando a ser respondidas. Apesar dos grandes avanços recentes, não sabemos do que é feito 95% do Universo. Novos instrumentos no céu e na Terra devem ajudar os cientistas a responder essas questões fundamentais. Nesse artigo faremos uma breve introdução à Cosmologia, a Ciência que estuda o Universo.

## Box 1: Nossa galáxia, a Via-Láctea



Concepção artística de nossa galáxia, a Via-Láctea. Nosso sol é uma das bilhões de estrelas que existem nela... e nossa galáxia é uma das bilhões que existem no universo (fonte: <http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/gallery.cfm?Category=Planets&Page=15>).

Devemos nos considerar privilegiados, pois somos a primeira geração a ter capacidade tecnológica para estudar cientificamente o universo, graças ao desenvolvimento de instrumentos de alta precisão, desde os grandes telescópios dos montes Wilson e Palomar, ambos nos Estados Unidos, ao telescópio espacial Hubble e aos satélites COBE (Cosmic Background Explorer) e WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Sem o avanço tecnológico dos últimos 50 anos, seria impossível formular e testar teorias sobre o universo. Esses instrumentos trouxeram e alguns ainda trazem muitas informações acerca do universo.

Paradoxalmente, ao mesmo tempo que alcançamos um estágio de grande conhecimento, sabemos que a maior parte do universo é feita de algo que ainda não compreendemos: a **matéria escura** e a **energia escura**, que abordaremos mais adiante.

### A estrutura do universo

Antes de discutirmos a estrutura do universo temos que introduzir a unidade de distância apropriada a seu estudo. Quando lidamos com o tamanho de uma sala, usamos o metro (m) como unidade. Quando olhamos em um mapa das estradas brasileiras, a unidade mais apropriada é o quilômetro (km). Obviamente podemos expressar a distân-

cia entre duas cidades em unidades menores, como o centímetro, mas certamente não é conveniente. Da mesma maneira, quando estudamos distâncias entre objetos no universo, a unidade mais apropriada é o ano-luz, definido como a distância que a luz percorre em um ano. A velocidade da luz no vácuo é de 300 mil quilômetros por segundo e, portanto, um ano-luz equivale a cerca de 10 trilhões de km. Outra unidade relacionada ao ano-luz e também muito usada é o parsec, que equivale a 3,26 anos-luz.

Para se ter uma noção de distâncias usando a velocidade da luz, vamos citar alguns exemplos: o perímetro da Terra é de aproximadamente 0,1 segundo-luz; a distância da Terra ao Sol vale cerca de oito minutos-luz; a estrela mais próxima de nós (Alfa Centauro) está a 4,2 anos-luz, enquanto uma das galáxias mais próximas (Andrômeda) encontra-se a cerca de 2 milhões de anos-luz. O tamanho do universo que podemos em princípio observar é de cerca de 13 bilhões de anos-luz.

É importante notar que, quando olhamos para um objeto muito distante, estamos vendo como ele era quando emitiu a luz que nos chega hoje, ou seja, estamos olhando para

o seu passado. Por exemplo, a luz que observamos hoje de Andrômeda e que imprime sua imagem em uma chapa fotográfica levou 2 milhões de anos para chegar até nós e, portanto, mostra como era essa galáxia há 2 milhões de anos atrás.

Observações indicam que o universo é organizado de uma maneira hierárquica até uma escala de tamanho de 300 milhões de anos-luz: estrelas formam galáxias (tipicamente com dezenas de bilhões de estrelas), galáxias formam aglomerados de galáxias e aglomerados de galáxias formam superaglomerados de galáxias. Existem projetos dedicados a fazer um mapa do universo. O mais completo desses projetos, denominado Sloan Digital Sky Survey (SDSS), está fazendo um levantamento com cerca de 1 milhão de galáxias (ver Box 2). O resultado é que nessas escalas de até 100 milhões de parsecs, o universo parece um queijo suíço, com estruturas que parecem paredes onde há uma grande concentração de galáxias cercandando regiões praticamente vazias.

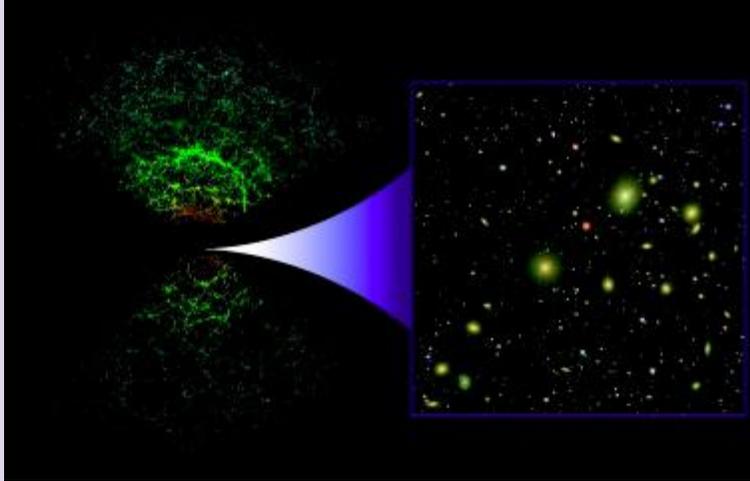
Em escalas bem maiores de 100 milhões de parsecs, há evidências de que o universo é homogêneo ou uniforme, isto é, não apresenta, na média, regiões muito diferentes. Isso significa que não seria possível distinguir ou privilegiar uma dada

**Paradoxalmente, ao mesmo tempo que alcançamos um estágio de grande conhecimento, sabemos que a maior parte do universo é feita de algo que ainda não compreendemos: a matéria escura e a energia escura**

região. Lembrando que estamos olhando para o passado, o universo primitivo foi muito mais homogêneo do que é hoje. De fato, como veremos mais adiante, as galáxias ainda não haviam sido formadas no passado. Mais ainda: o universo primitivo também foi isotrópico, ou seja, ao observá-lo em diferentes direções, os resultados são semelhantes.

Concluimos, portanto, que não existe uma posição privilegiada no universo, pois todas elas são equivalentes. Isso equivale a dizer que não há um "centro" do universo.

## Box 2: A estrutura do universo



O estudo da estrutura do universo realizada pelo SDSS é feita em duas etapas: galáxias são identificadas em imagens bi-dimensionais (à direita) e, com a determinação de suas distâncias, um mapa tri-dimensional com profundidade de 2 bilhões de anos-luz é criado (à esquerda), onde cada galáxia é representada por um ponto e a cor representa sua luminosidade. Essa figura mostra “apenas” 66.976 das 205.443 galáxias identificadas pelo SDSS (fonte: <http://www.sdss.org/news/releases/20031028.powerspectrum.html>).

vão se afastando umas das outras. De fato, formiguinhas posicionadas em cada mancha veriam todas as outras manchas se afastando dela. Cada formiguinha pensaria que está no centro da expansão do balão. Mas, como já vimos, não existe um centro.

Se o universo não é estático, isto é, evolui, então ele possui uma história. Podemos pensar na evolução atual do universo como um filme. Rodando o filme de trás para frente, percebemos que no passado as galáxias estavam mais próximas umas das outras. Conseqüentemente houve, portanto, um momento em que todas as galáxias estavam juntas (na verdade, as galáxias não existiam no passado, tendo sido formadas durante a evolução do universo, a aproximadamente 1 bilhão de anos após o início), quando o balão estaria totalmente murcho (temos que imaginar que o balão se reduz a um ponto nesse caso). Esse seria o instante inicial do filme, e o tempo decorrido a partir daquele início até o presente é o que chamamos de idade do universo.

Conhecendo-se a velocidade das galáxias e as distâncias delas até nós, podemos estimar o tempo que elas levaram para que chegassem onde estão hoje. Com base na teoria da relatividade geral de Einstein, complementada com dados observacionais, foi possível chegar a uma boa estimativa da idade do universo: cerca de 13 bilhões de anos.

À medida que rodamos o filme da história do universo ao contrário, notamos que, como as galáxias ficam mais próximas umas das outras, o universo fica cada vez mais denso. Também, devido a essa compressão, o universo fica mais quente — quem já encheu um pneu de bicicleta com uma bomba manual talvez já tenha verificado que a bomba se aquece devido à compressão do ar. Levando essa contração ao extremo, concluímos que o universo começou sua evolução a partir de um estado extremamente quente e denso. Por esse motivo, a teoria que descreve essa evolução é denominada de *big bang*, desenvolvida princi-

## A evolução do universo

Uma das maiores descobertas do século passado foi, sem dúvida, o fato de que o universo está em expansão. Por muito tempo, pensou-se que, descontado o movimento aparente das estrelas devido à órbita da Terra ao redor do Sol, o universo seria estático, imutável. Mesmo Einstein acreditava nisso, pois não havia evidências experimentais do contrário. Porém, em 1929, o astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889–1953) observou que as galáxias estão se afastando de nós, ou seja, que o universo está em expansão.

Mas será então que estamos no centro do universo? Afinal de contas todas as galáxias estão se afas-

**Conhecendo a velocidade das galáxias e as distâncias delas até nós, podemos estimar o tempo que elas levaram para que chegassem onde estão hoje. Uma boa estimativa para a idade do universo é de cerca de 13 bilhões de anos**

tando de nós! Para responder a essa pergunta, vamos imaginar o seguinte caso, que é análogo ao que acontece no universo: suponha que tenhamos nos transformado em pessoas “chatas” (no sentido de achatadas ou bidimensionais) ou em

formigas, daquelas espécies muito pequenas. Imaginemo-nos, agora, movendo-nos sobre a superfície de um balão de borracha, desses comuns em festas infantis, no qual tenhamos pintado, com uma caneta, manchas com o mesmo tamanho e formato para representar as galáxias. Para nós, em nossa nova forma (seres achatados ou formiguinhas), não existe nenhum ponto privilegiado ou centro na superfície do balão. Seria a mesma coisa que nos perguntar qual é o centro da superfície do planeta Terra. Lembremos de que, pelo fato de agora sermos

achatados, o espaço em que podemos nos mover é apenas a superfície curva do balão, ou seja, não temos acesso ao seu interior. Essa analogia bi-dimensional é mais fácil de imaginar do que um espaço curvo de três dimensões, que é o caso do nosso universo.

Nessa analogia, a expansão do universo é representada pelo enchimento do balão. À medida que o balão enche, as galáxias (manchas)

palmente pelo físico teórico russo George Gamow (1904-1968), que fez importantes trabalhos na área de cosmologia.

Quando esquentamos o gelo, ele derrete, formando água e, se continuamos a esquentar a água, ela evapora. O gelo, a água e o vapor são diferentes fases da água. Da mesma maneira, o universo passou por diferentes fases, dependendo de sua temperatura em um dado momento. Lembrem-se que temperatura e densidade aumentam à medida que olhamos cada vez mais no passado do universo. Uma das conseqüências mais interessantes é a de que, somente depois de aproximadamente 400.000 anos após o início do universo, sua temperatura ficou menor que alguns milhões de graus, correspondente à energia de ligação do hidrogênio. Foi apenas depois dessa época que os átomos puderam se formar. Antes disso o universo era um plasma de núcleos atômicos leves (hidrogênio e hélio, principalmente) e elétrons, fortemente acoplados pela radiação eletromag-

nética (luz). Assim, o universo era opaco antes dessa época. Depois de 400.000 anos, os átomos desses elementos leves puderam se formar e o plasma se neutralizou, tornando o universo transparente, pois os fótons não interagem diretamente com matéria eletricamente neutra. Chamamos a esse fenômeno de *recombinação*.

Ainda mais no passado (mais próximo ao início do universo), a temperatura e densidades eram ainda muito maiores, de modo que em seus primeiros momentos o universo era constituído por uma "sopa" quentíssima de partículas elementares. A teoria da relatividade geral, suplementada pela teoria da física das partículas elementares, fornece um modelo para a evolução do universo, o chamado Modelo Cosmológico Padrão, nome

mais pomposo para o *big bang*.

### Fósseis do big bang

Uma das diferenças entre ciência e mitologia consiste justamente no fato de que modelos científicos devem ser verificados experimentalmente para serem comprovados ou rejeitados. Caso nossos modelos não possam ser verificados, ou seja, caso eles não façam previsões passíveis de teste, então estamos fazendo filosofia.

O Modelo Cosmológico Padrão faz previsões sobre fenômenos que ocorreram bilhões de anos atrás. Como podemos verificá-las? Felizmente, a evolução do universo deixou traços desses fenô-

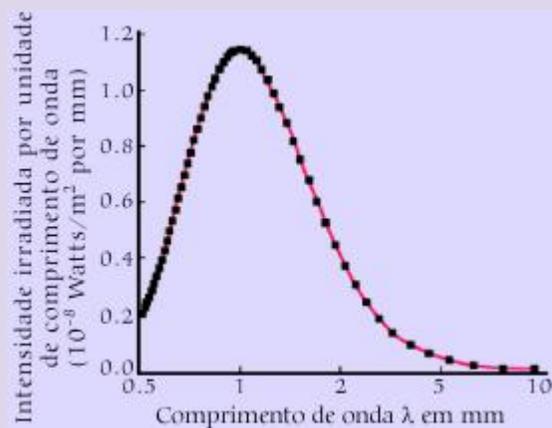
**Somente 400.000 anos após o início do universo sua temperatura ficou menor que alguns milhões de graus, correspondente à energia de ligação do hidrogênio. Foi então que os átomos puderam se formar, em um fenômeno que foi batizado *recombinação***

menos que podemos detectar hoje e assim testar o modelo. Pode-se dizer que encontrar os fósseis deixados pela evolução do universo é um tipo de arqueologia cósmica. Aqui, nos

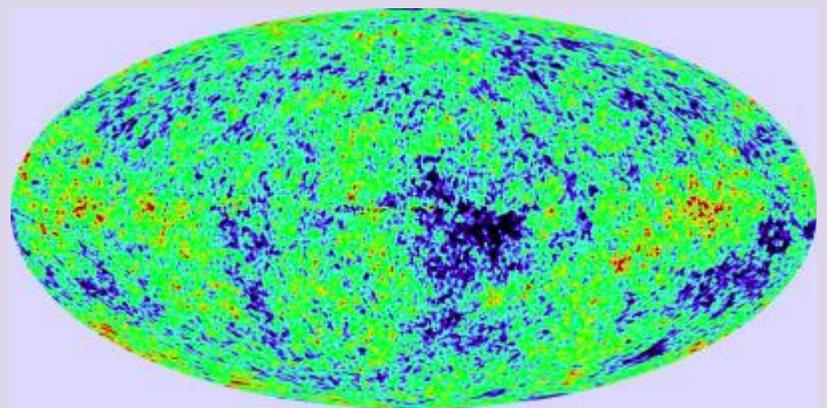
### Box 3: A radiação cosmológica de fundo

Em 1964, os físicos norte-americanos Robert Wilson e Arno Penzias estavam trabalhando no laboratório da Companhia Telefônica Bell (Estados Unidos) com uma grande antena para detectar sinais fracos de rádio usados para comunicação telefônica. Com esse equipamento, eles captaram um ruído que não desaparecia, apesar de todos os esforços. Eles verificaram também que o ruído vinha de todo o espaço com a mesma intensidade, independentemente da direção para onde eles apontassem a antena.

Sem a menor idéia sobre a origem do ruído, Wilson e Penzias foram conversar com físicos da Universidade de Princeton. Os colegas imediatamente reconheceram na descoberta o sinal do 'calorzinho' que denominamos radiação cosmológica de fundo, um tipo de reverberação do *big bang*, prevista em 1948 por George Gamow e colaboradores. Penzias e Wilson receberam o prêmio Nobel em 1979 por sua descoberta acidental.



O espectro da radiação cosmológica de fundo medida pelo satélite COBE comparada com um ajuste da fórmula de Planck com uma temperatura de 2,74 K (fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/bkg3k.html>).



Pequenas flutuações na radiação cósmica de fundo medidas pelo satélite WMAP. As cores artificiais são geradas de maneira que os pontos vermelhos são mais quentes e os azuis são mais frios. Essa luz capturada pelo experimento foi emitida quando o universo tinha apenas aproximadamente 400.000 anos, há mais de 13 bilhões de anos atrás, sendo um verdadeiro fóssil da história do universo (fonte: [http://map.gsfc.nasa.gov/m\\_mm.html](http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html)).

concentraremos em dois desses “fósseis”, que foram decisivos para determinar o sucesso do Modelo Cosmológico Padrão: a radiação cosmológica de fundo e a abundância de elementos leves.

O Modelo Cosmológico Padrão descreve o universo iniciando sua evolução a partir de um estado extremamente quente e denso. O universo, então,

se expande e esfria. O que restou hoje desse grande calor inicial equivale a uma temperatura de apenas 270 graus celsius negativos, muito próxima do chamado zero absoluto de temperatura. Portanto, todo o espaço é permeado por esse “calorzinho” ou radiação que sobrou do *big bang*. Essa é uma previsão do modelo, realizada em 1948 por Gamow e colaboradores. Pouco menos de duas décadas mais tarde, esse “eco” do *big bang* foi detectado por uma grande antena de comunicação nos laboratórios Bell, nos EUA. Hoje em dia ela representa o melhor espectro de corpo negro já medido (ver Box 3). O estudo experimental e teórico dessa chamada radiação cosmológica de fundo tem sido fundamental para o desenvolvimento da cosmologia. A radiação cosmológica de fundo é extremamente homogênea, mas suas pequenas variações de uma parte em 10.000, detectadas no início da década de 1990, deram origem às galáxias, estrelas e, ultimamente, a nós.

Um outro fóssil do início do universo está na presença de alguns elementos leves, como o deutério e o hélio, formados na fornalha cósmica que era o universo três minutos depois de seu surgimento, situação na qual a temperatura atingia cerca de um bilhão de graus. Os ou-

**A radiação cosmológica de fundo é extremamente homogênea, mas suas pequenas variações de uma parte em 10.000, detectadas no início da década de 1990, deram origem às galáxias, estrelas e, ultimamente, a nós**

**Núcleos atômicos, como o carbono e ferro, também foram (e são) sintetizados através de reações nucleares no interior de estrelas e ejetados quando estas explodem em eventos chamados supernovas. Esse processo de formação de elementos químicos é denominado nucleossíntese**

tros elementos, como nossos átomos de carbono, oxigênio, etc., foram sintetizados no interior de estrelas, onde as altíssimas temperaturas permitem produzi-los atra-

vés de reações nucleares. Esses elementos são ejetados das estrelas quando estas explodem em eventos chamados supernovas. Esse processo de formação de elementos é denominado nucleossíntese.

O Modelo Cosmológico Padrão prevê que aproximadamente a quarta parte de toda a matéria do universo foi convertida em hélio. Cálculos sofisticados também resultam em previsões para a abundância no universo de deutério e lítio. Esses números foram verificados observacionalmente nos últimos 20 anos (não é simples realizar essas medidas) e seu acordo com o Modelo Cosmológico Padrão representam mais um sucesso a seu favor.

### Do que é feito o universo?

Perguntas simples de serem formuladas geralmente possuem respostas complexas. Por exemplo, se me perguntassem do que é feita a mesa que estou usando para escrever esse texto poderia responder simplesmente de que a mesa é feita de madeira. A resposta é correta mas pode não satisfazer totalmente a curiosidade de uma mente inquiridora. “Mas do que é feita a madeira?” seria a próxima pergunta. Uma sequência de perguntas deste tipo nos leva rapidamente à fronteira do conhecimento científico no mundo mi-

croscópico. A madeira é feita de moléculas e estas são compostas de átomos. Os átomos, apesar do nome de origem grega que significa indivisível, são de fato formados por um núcleo pesado contendo prótons e nêutrons e com elétrons orbitando ao seu redor. A estrutura do átomo, que começou a ser desvendada por Lord Rutherford nos anos de 1910, é o que geralmente aprendemos na escola. Hoje sabemos que os prótons e nêutrons são formados por outras partículas, denominadas quarks e gluons, mas isso não será relevante para nosso propósito. Portanto, ao invés de responder que a mesa é feita de elétrons, quarks e gluons, aqui será suficiente responder que a mesa é feita de átomos.

Aumentando um pouco nosso escopo, vamos atentar para o mundo que nos cerca, como o nosso planeta. Do que é feito o planeta Terra? Sem dúvida, toda a diversidade de nosso planeta pode ser reduzida a átomos. Mas não é só isso. Por exemplo,

caso não houvesse luz ao nosso redor, não conseguiríamos enxergar nada. A luz é apenas um exemplo particular do que chamamos de radiação eletromagnética, que abrange desde a radiação de nossos fornos de microondas até os raios-X usados para fazermos radiografias. Sabemos desde o início do século passado que a luz é feita de uma torrente de partículas elementares denominadas fótons.

Um outro ingrediente que temos ao nosso redor mas que não notamos são partículas de um tipo diferente produzidas em reações nucleares, como as que ocorrem no Sol ou em reatores aqui na Terra. São os chamados neutrinos, que interagem tão fracamente que bilhões deles podem passar por nossos corpos sem que percebamos. Eles foram detectados apenas na década de 1950, com o desenvolvimento dos primeiros reatores nucleares para geração de eletricidade. Podemos então responder simplificada-

**O Modelo Cosmológico Padrão descreve o universo iniciando sua evolução a partir de um estado extremamente quente e denso**

que no nosso planeta temos átomos, fótons e neutrinos.

Vamos agora iniciar nossa tentativa de responder à pergunta: do que é feito o universo? Primeiramente, temos que enfatizar algo óbvio: o universo é muito grande. Como podemos tentar responder a essa pergunta se nunca conseguimos sequer enviar espaçonaves para as redondezas do nosso sistema solar? Certamente temos que inferir a composição do universo a partir de observações realizadas por instrumentos aqui na Terra ou em sua órbita.

Como primeira tentativa, poderíamos pensar que o universo é feito das mesmas coisas que estão no nosso planeta: átomos, fótons e neutrinos. De fato, por muitos anos esse foi o paradigma científico. Esse paradigma começou a ruir quando observações iniciadas na década de 1930 pelo astrônomo suíço Fritz Zwicky, realizadas no observatório americano do Monte Wilson, mostraram que o peso das galáxias (ou, mais precisamente, a quantidade de massa), é cerca de 100 vezes maior que o de todas as estrelas da galáxia somadas. Portanto, existe na galáxia um tipo de matéria que não irradia luz, que ficou conhecida pelo nome de matéria escura (matéria transparente seria mais apropriado) (ver Box 4). Na década de 1970, avanços em cosmologia mostraram como calcular a quantidade de átomos de elementos leves, como o hélio e o deutério, que teriam sido produzidos nos três primeiros minutos do universo. Para explicar as quantidades observadas desses elementos leves em galáxias distantes, apenas uma fração muito pequena do universo, aproximadamente 5%, seria composta de átomos. Uma fração ainda muito menor corresponderia a fótons e neutrinos. Portanto, a maior parte do universo não é feito do mesmo material que nós somos feitos, de átomos. Mas então qual a composição dos outros 95% do universo?

Não temos ainda uma resposta definitiva. Chegamos à fronteira do conhecimento macroscópico. A

#### Box 4: Evidências para a existência da matéria escura

A teoria da gravitação de Newton prevê que a velocidade de rotação ( $v$ ) de um corpo ao redor de outro de massa  $M$  como função do raio ( $r$ ) é dada por:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GmM}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Essa relação é satisfeita com grande precisão no nosso sistema solar (ver Figura 1).

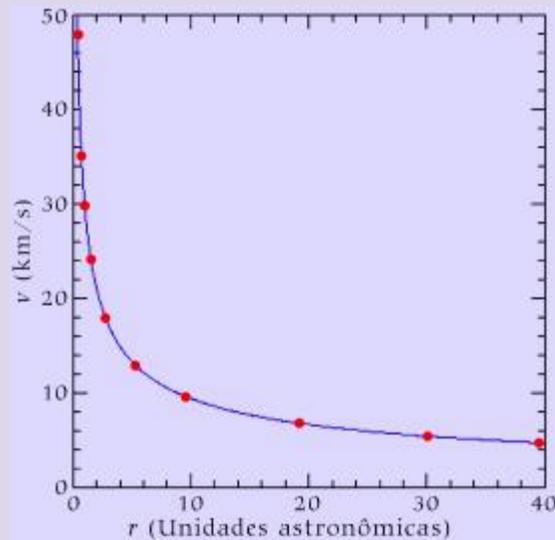


Figura 1: Curvas de rotação para os 10 planetas de nosso sistema solar (fonte: <http://bustard.phys.nd.edu/Phys171/lectures/dm.html>).

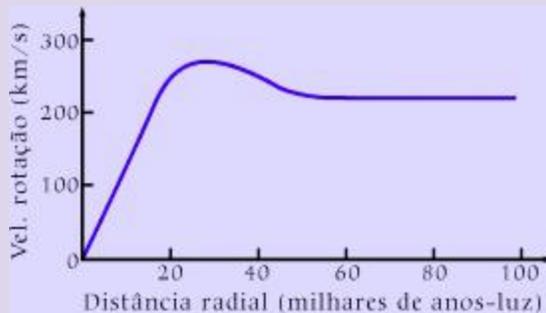
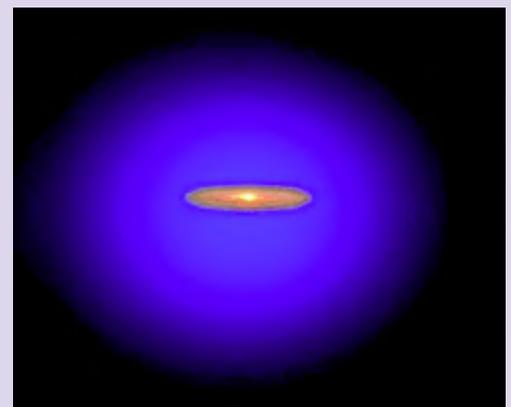


Figura 2: Curva de rotação para a galáxia de Andrômeda (fonte: <http://bustard.phys.nd.edu/Phys171/lectures/dm.html>).

Figura 3: Concepção artística de uma galáxia de matéria visível (a parte central, mais avermelhada) envolta em um halo esférico de matéria escura (mostrada em azul). Note que a presença de matéria escura se estende muito além das estrelas e poeira que formam a matéria visível e que identificamos, efetivamente, como nossa galáxia. A matéria escura na realidade é invisível (por isso a figura é apenas uma imagem artística), mas suas propriedades são determinadas indiretamente através de seu efeito gravitacional no movimento das estrelas e nuvens de gás da galáxia.



Para galáxias, a massa como função do raio inicialmente cresce com  $M(r) \propto r^3$ , o que implica em  $v \propto r$  (assumimos uma densidade constante por simplicidade) até sua borda (onde não deveria haver mais muita matéria) e depois permanece constante. Portanto, a curva de rotação em uma galáxia deveria inicialmente aumentar linearmente e depois decrescer com o inverso da raiz quadrada da distância. Porém, o que se observa de fato é algo como o que mostra a Figura 2, onde a curva de rotação permanece praticamente constante mesmo para distâncias maiores que a borda visível da galáxia. Esse comportamento indica que a massa da galáxia cresce com  $M(r) \propto r$  além da borda visível da galáxia, indicando a presença de matéria escura. Essa matéria escura estaria presente em um halo invisível esféricamente simétrico ao redor da galáxia, como mostrado em azul na Figura 3. Existem muitas outras evidências da existência de matéria escura: dinâmica de galáxias em aglomerados de galáxias, efeitos de lentes gravitacionais, efeitos na curvatura do universo e outros.

dinâmica das galáxias indica que 25% do universo é composto por um novo tipo de partícula elementar responsável pela matéria escura. Essa matéria, que não emite luz, compõe grande parte das galáxias no universo. Possíveis candidatos são postulados por várias teorias, mas ainda não foram produzidos ou detectados no laboratório. Existem vários experimentos tentando

**A composição do universo:**  
**5% de átomos,**  
**25% de uma partícula**  
**elementar ainda não**  
**descoberta e...**  
**70% de um meio difuso com**  
**propriedades exóticas**  
**(pressão negativa), cuja**  
**origem não conhecemos**  
**ainda!**

capturar uma dessas partículas que circulam em nossa galáxia. A dificuldade é que essas partículas devem interagir muito fracamente e possuir uma densidade pequena, tornando sua detecção problemática. Há também a possibilidade fascinante de *criar* essas partículas nos grandes anéis de colisão. Em particular, o Large Hadron Collider, que vai entrar em operação em 2007 no laboratório CERN, na Suíça, poderá finalmente resolver o mistério da matéria escura. Eis aí uma conexão entre o macro e o microcosmo.

Mas a Natureza tinha ainda uma outra surpresa guardada para os cientistas. Graças a uma descoberta em 1998, considerada pela revista Science como uma das mais importantes do século XX, sabemos hoje que cerca de 70% do universo é composto de algo difuso, que não se concentra em galáxias e que provoca a expansão *acelerada* do universo. Como a gravidade é sempre atrativa, todos esperavam que a expansão do universo estivesse desacelerando! Podemos imaginar então a presença de um meio extremamente tênue que permeia todo o universo. Esse meio, porém, tem propriedades diferentes de um meio material: apresenta uma pressão grande e *negativa*, o que causa um efeito de anti-gravidade, resultando na expansão acelerada observada. A esse meio foi dado o nome de *energia escura*. Esse meio poderia ser formado pela chamada *constante cosmológica*, proposta por Einstein para explicar por-

que o universo seria estático, que era o paradigma do início do século XX. Com a descoberta da expansão do universo, Einstein reconheceu nessa constante seu maior erro. Talvez Einstein estivesse certo, afinal. Outros modelos alternativos existem para esse meio, com nomes exóticos e apelativos como quintessência, mas ainda estamos aguardando por mais fatos experimentais para confirmar ou excluir mo-

delos. Novos instrumentos de observação na Terra e no espaço, alguns já em operação, serão fundamentais para elucidar esses mistérios.

## Conclusão

Estamos vivendo uma fase

fascinante e efervescente no estudo em cosmologia. Temos informações detalhadas e precisas sobre o universo. Essas informações produziram resultados surpreendentes: o universo está em expansão acelerada, é aproximadamente plano e não conhecemos 95% dele! Eis a receita de universo: 5% de átomos, 25% de uma partícula elementar ainda não descoberta e 70% de um meio difuso com propriedades exóticas (pressão negativa), cuja origem não conhecemos ainda. Certamente essas conclusões apontam para a necessidade de novos modelos em física de partículas elementares e teoria de campos. Novos instrumentos planejados ou já em atividade testarão esses novos modelos. Uma verdadeira revolução está em curso, da qual resultará um novo paradigma para as futuras gerações.

## Sugestões para leitura

- S. Weinberg, *Os Três Primeiros Minutos* (Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980). Excelente livro de divulgação escrito por um ganhador do prêmio Nobel em Física e pesquisador da área de cosmologia. Concentra-se na discussão dos primeiros instantes do universo, principalmente na época da formação de elementos leves.
- M. Gleiser, *A Dança do Universo*, (Editora Companhia das Letras, São Paulo, 1998). Exposição feita por um pesquisador brasileiro especialista em cosmologia e de caráter mais geral que o livro de Weinberg, discutindo a história e desenvolvimento da Física desde os gregos até a cosmologia moderna.
- H. Cooper e N. Henbest, *Big Bang: A História do Universo*, de (Editora Moderna, São Paulo, 1998). Livro com várias ilustrações excelentes e com muita informação. É divertido e informativo, mas sem grande aprofundamento.
- B. Greene, *O Universo Elegante: Supercordas, Dimensões Ocultas e a Busca da Teoria Definitiva*, de (Editora Companhia das Letras, São Paulo, 2001). Texto de divulgação escrito por um pesquisador da área de supercordas que descreve o desenvolvimento da Física no século XX, partindo da teoria da relatividade restrita e chegando até as supercordas. Porém não dedica muito espaço para a cosmologia.
- S. Hawking, *O Universo Numa Casca de Noz* (Editora Mandarim, São Paulo, 2001).

Novo livro de divulgação do renomado físico britânico em uma edição primorosa. Os primeiros três capítulos são excelentes mas o restante do livro é extremamente especulativo.

## Na Internet

- <http://www.nap.edu/readingroom/books/cosmology/index.html>. Excelente descrição sobre cosmologia desenvolvida pela Academia Americana de Ciência.
- <http://hepwww.rl.ac.uk/pub/bigbang/part1.html>. Páginas sobre cosmologia e física de partículas elementares desenvolvidas pelo Conselho Britânico de Pesquisa em Astronomia e Física de Partículas.
- <http://www.stsci.edu>. Nessas páginas, do Space Telescope Science Institute (Estados Unidos), pode-se encontrar fotografias tomadas pelo Telescópio Espacial Hubble e ter acesso aos resultados mais recentes obtidos por este projeto.
- <http://www.sdss.org/>. O Sloan Digital Sky Survey é um projeto americano para mapear o nosso universo com as posições de um milhão de galáxias. Nessas páginas, pode-se encontrar os avanços realizados por esse projeto.
- <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>. Curso de cosmologia da Universidade da Califórnia, em Los Angeles (Estados Unidos), pode ser feito por qualquer pessoa com nível de estudante de graduação em ciências exatas. Possui também notícias atualizadas sobre pesquisas em cosmologia.



.....  
**Maria Cristina Batoni Abdalla**  
Instituto de Física Teórica, UNESP  
e-mail: mabdalla@ift.unesp.br  
.....

**Q**uantas e quais são as partículas elementares que compõem a matéria observada no nosso universo? Não exatamente usando o conceito de partículas elementares (que é moderno), durante milhares de anos temos buscado uma resposta a essa pergunta que aparentemente parece simples. Os gregos já tinham idéia de que a matéria era composta de átomos (do próprio grego indivisível). Essa concepção de indivisibilidade hibernou por mais de 25 séculos e somente no ano de 1897 o átomo foi “quebrado” pelo físico inglês Joseph John Thomson e a primeira partícula elementar foi descoberta: o elétron. A última partícula elementar encontrada (bem menos conhecida) foi o neutrino do tau em 2000, por uma equipe de físicos do Fermi National Laboratory (Fermilab), Estados Unidos.

A física moderna precisou de 103 anos para descobrir e classificar todas essas pequeninas partículas fundamentais. O modelo que classifica as partículas elementares começou a ser formulado teoricamente em meados da década de 1960, mas só foi coroado de êxito duas décadas depois, no final de 1982, com a fantástica descoberta dos bósons mediadores ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ) da interação fraca.

Recomendamos fortemente que, antes de o leitor prosseguir nessa leitura, os trabalhos de Ostermann (2001) e Moreira (2004), já publicadas nesta mesma revista, fossem lidas e estudadas cuidadosamente, pois vários termos e conceitos utilizados aqui estão lá explicados e colocados no contexto da física de partículas de uma forma bem didática.

O século passado testemunhou a descoberta de centenas de novas partículas. Até o início da década de 1950, a grande maioria das partículas descobertas foi erroneamente considerada elementar, pois o método de observação utilizado não permitia ver-lhes a natureza mais íntima. O critério que define elementar até que não é difícil – é até bastante intuitivo: toda partícula que pode ser quebrada não é elementar, e toda aquela que tem um único constituinte é considerada elementar. No entanto, do ponto de vista experimental e teórico, o conceito não é tão simples assim; há grandes dificuldades quanto aos limites intrínsecos à observação, e há também dificuldades na concepção dos modelos teóricos que descrevem o comportamento da matéria.

Do ponto de vista teórico, o conceito que define uma partícula elementar é, antes de tudo, de natureza abstrata e matemática. Todas as partículas elementares são descritas por objetos matemáticos denominados *funções de onda*, a partir das quais são extraídas informações sobre a dinâmica de tais partículas. A função de onda que descreve uma partícula elementar não pode ser redutível à função de onda de outras partículas. Essa linguagem é ditada pela mecânica quântica e, para nossos propósitos, parece um bocado complicada. É difícil transmitir os conceitos que envolvem a função de onda a quem não é especialista. Além disso, como seria impossível construir a família das partículas elementares de um ponto de vista estritamente teórico, optamos por contar sobre suas descobertas teóricas e experimentais em uma organização histórica cronológica, fazer uma representação artística para as características dessas partículas e depois acomodá-las no modelo aceito hoje em dia que é chamado de Modelo Padrão

---

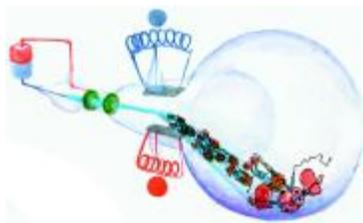
Quantas e quais são as partículas elementares que compõem a matéria observada no nosso universo? Neste artigo contamos brevemente a descoberta destas partículas elementares. Representações lúdicas e artísticas tentam amenizar para o leitor essa aventura maravilhosa.

(MP). É importante ficar claro que os desenhos artísticos utilizados neste trabalho pretendem fazer apenas uma representação gráfica para as características das partículas (como a massa, por exemplo, que em última análise é o que se mede) e assim atrair a atenção dos não-iniciados de uma forma divertida e pitoresca, de modo que a informação visual fique retida e, principalmente, para eliminar a idéia de que as partículas elementares são “bolinhas”.

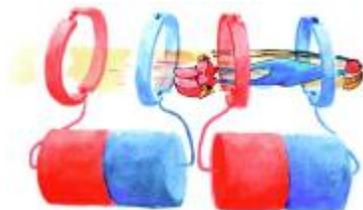
O Modelo Padrão (MP) estabelece: toda a matéria de que se tem notícia é composta de três tipos de partículas elementares: léptons, quarks<sup>1</sup> e as mediadoras, e que um punhadinho de 61 partículas basta para construir toda a matéria observada neste universo (incluindo, é claro, as observadas em laboratórios). Como chegamos a esse número? Quais são elas? Como estão classificadas? Essas são algumas das perguntas que tentaremos responder. Contudo, não temos condição de fazer aqui uma revisão sobre conceitos da mecânica quântica para depois falar em “partícula elementar” e seus “números quânticos”. Vamos nos deter às descobertas e ao mesmo tempo situar essas descobertas no contexto histórico.

O elétron ( $e^-$ ) foi a primeira partícula elementar a ser descoberta. Thomson, em 1897 realizou uma experiência com raios catódicos na Ampola de Crooks e flagrou a divisibilidade do átomo, ganhando o Prêmio Nobel em 1906.

Veja, ao lado esquerdo, uma figura artística ilustrativa da Ampola de Crookes, onde um feixe das partículas que estavam sendo observadas passa primeiro por um campo elétrico, sendo acelerado, e depois por um campo magnético, que curva sua trajetória.

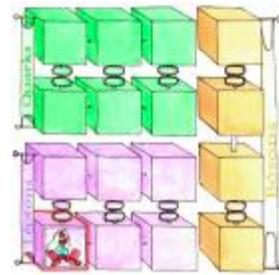


Thomson observou apenas um pontinho no bulbo da ampola e pela curva certificou-se que era o elétron. Na experiência há duas propriedades importantes sobre partículas carregadas, a saber: quando um elétron passa por um campo magnético, sua trajetória é curvada (veja figura ao lado direito). Ao passar por um campo elétrico o elétron é acelerado, como mostra a segunda figura à esquerda. Essas duas propriedades formam o princípio básico dos aceleradores de partículas carregadas como o colisor do European Laboratory for Particle Physics (CERN), em Genebra, Suíça.



A questão que colocamos agora é a seguinte: Conhecidas as propriedades do elétron, como ele é classificado no MP? Uma forma pictórica de representar o MP é o quadrado ao lado, com 16 caixinhas onde temos espaço para 6 léptons (caixinhas roxas), que não interagem fortemente, para 4 quarks (caixinhas verdes) que interagem fortemente e 4

partículas mediadoras (caixinhas amarelas). Sabemos que o elétron tem massa, carga elétrica e spin  $1/2$  (lembre-se das aulas de Química sobre distribuição eletrônica) e ele é um férmion fundamental<sup>2</sup> que não interage fortemente (não tem interação nuclear), portanto é um lépton e por isso vai ocupar a primeira caixa roxa da figura acima.



O fóton ( $\gamma$ ) é a segunda partícula elementar a entrar no cenário. Em 1905, o físico alemão Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico usando a hipótese de que a luz é formada de pacotinhos de energia que mais tarde receberam o nome de fóton<sup>3</sup>. O fóton também é conhecido como quantum de luz. Por mais incrível que possa parecer, o fóton não tem massa – é uma partícula que só tem energia e seu spin é 1, e portanto ele é um bóson. Na figura ao lado representamos artisticamente as características do fóton.

Ao lado ilustramos o efeito fotoelétrico: quando a luz (fótons) que incide em uma placa de metal tem energia suficiente, os elétrons do metal podem ser arrancados e ejetados, porque eles adquirem energia cinética proveniente dos fótons e com essa energia cinética eles “pulam” da placa. Elétrons são, então, emitidos de metais iluminados, e a energia dos elétrons, ao contrário do que se podia imaginar, depende da frequência da luz (cor) e não da sua intensidade. Na verdade, quanto maior a intensidade da luz, mais elétrons “pulam” da placa, mas todos com a mesma energia!



Einstein mostrou que esse fenômeno poderia ser explicado se a luz de frequência ( $f$ ) fosse composta de quanta individuais de energia ( $hf$ ). Ganhou, por essa descoberta, o prêmio Nobel de 1921. Em 1923, dezessete anos depois da proposta teórica de Einstein, o fóton foi confirmado na experiência do efeito Compton (no espalhamento Compton, o fóton que bombardeia o elétron em repouso perde energia e se espalha com energia menor). No MP, o fóton é umas das partículas mediadoras e vai ocupar o primeiro lugar dos bósons mediadores.



Cronologicamente, a próxima partícula encontrada foi o próton (vem do grego *protos* e quer dizer *o primeiro*). Em 1919, o próton foi descoberto pelo físico Ernest Rutherford através do bombardeamento do nitrogênio por partículas alfa (núcleos do átomo de hélio), resultando em um isótopo do oxigênio mais um núcleo do átomo de hidrogênio (próton), com mostra a reação a seguir.

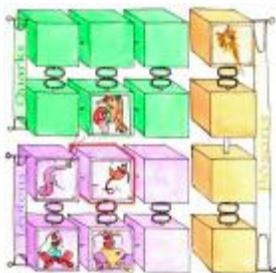


bolhas apresentava sempre a forma de um V invertido. Por essa particularidade, elas chegaram a ser conhecidas como *partículas V*. Hoje sabemos que as partículas estranhas são produzidas pela força forte e que seus decaimentos são regidos pela força fraca. Cerca de 10 anos mais tarde, esse conceito deu origem ao quark estranho (s), que está representado artisticamente na página anterior.

Em 1962, cientistas do Brookhaven National Laboratory (BNL) observaram a primeira evidência do neutrino do múon ( $\nu_\mu$ ), fato que mostrava a existência de mais de um tipo de neutrino. O Prêmio Nobel foi outorgado a Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger, em 1988, os três da universidade de Columbia, Estados Unidos, e



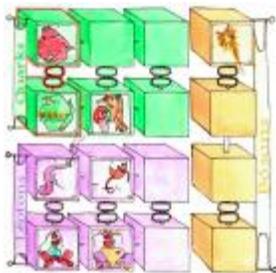
fizeram a descoberta utilizando o Alternating Gradient Synchrotron (AGS), na época um dos mais sofisticados aceleradores do mundo. O experimento utilizou um feixe de prótons energéticos do AGS para produzir um verdadeiro chuveiro de mésons  $\pi$ , que viajaram 70 pés (2.133,6 cm) de uma parede de 5.000 toneladas de aço fabricada com placas de um velho couraçado. No caminho, os mésons decaíram em múons e neutrinos, mas só estes últimos podem passar através da parede na direção de um detector pleno de neon. Dentro da câmara, o impacto dos neutrinos contra placas de alumínio produziu rastos do múon, que foram detectados e fotografados, comprovando a existência de neutrinos do múon. No MP, o neutrino do múon ocupa a caixa roxa acima do múon, completando a segunda família dos léptons.



### Vamos falar agora dos quarks *up* (u) e *down* (d)

Na década de 60, alguns físicos passaram a reviver uma idéia

que havia sido descartada no passado e que considerava a hipótese de os hádrons<sup>2</sup> serem formados por um punhado de “tijolinhos” fundamentais, responsáveis pela existência de toda a matéria observada no universo. Gell-Mann publicou um trabalho brilhante, em 1964, propondo que todos os hádrons [2], seriam formados por três partículas fundamentais (e suas respectivas antipartículas), às quais nomeou *quark*, que são férmions de spin 1/2. A sorte de Gell-Mann foi que o modelo previa a existência da partícula  $\Omega^-$  e ela foi descoberta em pouquíssimo tempo. Esse fato atraiu atenção e interesse de muitos físicos. No MP os quarks *up* e *down* ocupam as duas primeiras caixas verdes, completando a primeira família de quarks.



Segundo o modelo de Gell-Mann, os quarks aparecem em três tipos: *up*, *down* e *strange*, denominados *sabores*,

além das suas respectivas antipartículas ( $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\bar{s}$ ). As regras básicas do modelo são de uma simplicidade impressionante: 1) os (anti)bárions são formados de 3 (anti)quarks ( $(\bar{q}\bar{q}\bar{q})qqq$ ; 2) os mésons são formados por um par quark-antiquark ( $q\bar{q}$ ). Com essas duas singelas asserções, **todas** as partículas conhecidas puderam ser entendidas e construídas. Enfatizamos aqui que a matéria comum, essa de nosso cotidiano, é feita de quarks leves u e d. Os exemplos



mais simples são o próton (uud) e o nêutron (udd). Agora sim, podemos entender porque o nosso cartunista desenhou o próton como sendo aquela figura tão estranha. Se você “tirar a roupa do próton” verá que ele é formado por 2 quarks *up* (os vermelhos) e um quark *down* (verde).

Apesar de fundamentais, quarks nunca foram observados livremente e eles só existem em estados ligados formando as partículas. Pensou-se até que encontrar um quark livre seria um evento muito raro. Foram analisadas amostras do leito antigo de oceanos, de meteoritos e até da poeira de camadas altas da atmosfera, e nunca se encontrou um só quark livre. Na verdade essa é uma característica da teoria à qual damos o nome técnico de *confinamento*.



Embora o modelo de Gell-Mann tenha se tornado um sucesso, havia um problema teórico que precisava de solução imediata. Aparentemente, violava o princípio de exclusão de Pauli, (dois férmions idênticos jamais podem ter os mesmos números quânticos ou ocupar o mesmo lugar no espaço). A partícula  $\Omega^-$  é formada por três quarks estranhos (sss) e, como cada s é um férmion, temos um problema: dois deles não poderiam ocupar o mesmo estado físico.

Ainda em 1964, dois físicos da Universidade de Chicago, Yoichiro Nambu e Moo-Young Han, resolveram o impasse propondo um novo número quântico: a cor. Os quarks, que certamente obedeciam ao princípio de Pauli, não só viriam em três sabores diferentes, mas também em três cores. Cada quark aparece em três versões coloridas: **vermelho**, **azul** e **verde**. Assim, uma forma possível de se escrever a partícula  $\Omega^-$ , formada por três quarks estranhos, seria ( $S_{\text{vermelho}} S_{\text{verde}} S_{\text{azul}}$ ), de maneira que todos os quarks estranhos fossem diferentes. Na linguagem do físico, não estariam mais no mesmo estado.

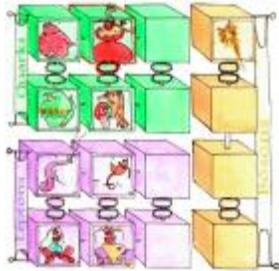
O charme (c) foi o quarto quark a ser proposto. Apesar de o nome *quark* revelar uma origem bem romanceada como conta seu inventor<sup>5</sup>, a mítica não funciona para o número 3, que estava longe de ser tão perfeito como Gell-Mann supôs inicialmente. Em 1964, os norte-americanos James Daniel Bjorken e Sheldon Lee Glashow propuseram a existência de outro férmion fundamental:



o quark charmoso. Um novo número quântico nomeado *charme* seria violado apenas nas interações fracas. No trabalho original, os autores preconizam a existência de muitas partículas charmosas, cuja descoberta seria cru-

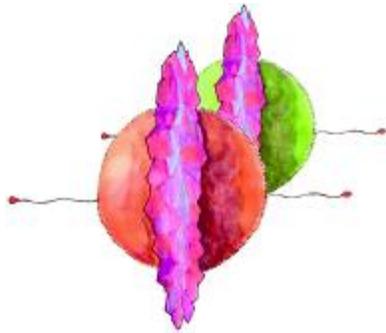
cial para testar a idéia. A idéia dos autores para a inclusão de um quarto quark foi, no início, baseada em argumentos puramente estéticos: afirmavam que os léptons fundamentais existiam em número de quatro ( $e^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\mu^-$ ,  $\nu_\mu$ ). Logo, por uma questão de simetria, os quarks fundamentais também deveriam existir em número de 4 (u, d, s, c). Assim como a matéria ordinária estável é formada pelos quarks leves u e d, os quarks mais pesados, s e c, compõem as partículas mais instáveis, que vivem muito pouco e são produzidas em reações nos laboratórios. O quark charmoso

foi observado no verão norte-americano de 1974, e deu metade do prêmio Nobel de 1976 ao grupo liderado por Samuel Chao Chung Ting, em Brookhaven, Estados Unidos. A outra metade foi para o norte-americano Burton Richter que liderava o grupo no Stanford Linear Accelerator Center (SLAC). No MP, ele ocupa a caixa verde acima da *estranheza*, completando a segunda família.



Na década de 1960, surge também uma nova teoria unindo a força eletromagnética e a força fraca em uma única superforça chamada *eletrofraca*. Em 1967, Steven Weinberg propôs um modelo para a síntese eletrofraca, em que as interações são mediadas por quatro bósons –  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , e  $\gamma$ . Os três primeiros são massivos e denominados *bósons mediadores*; o quarto é o fóton, que medeia a força eletromagnética e não tem massa. Abdus Salam, em 1968, e Sheldon Glashow, em 1970, trabalharam outros aspectos fundamentais para a formulação da chamada Teoria Eletrofraca.

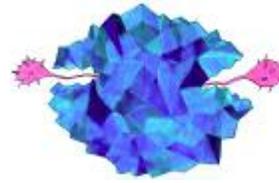
Em 1979, Weinberg recebeu o prêmio Nobel junto com Abdus Salam e Sheldon Glashow, mesmo sem que essas no-



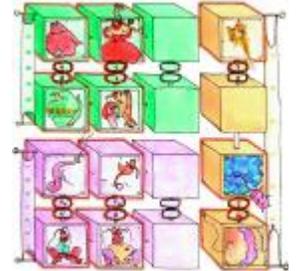
vas partículas mediadoras tivessem sido descobertas em laboratório. A confirmação experimental dos três bósons ocorreu em 1983, outorgando o prêmio Nobel de 1984 ao físico italiano Carlo Rubia, que liderava um experimento instalado no CERN. A experiência observou a colisão de um próton e um antipróton, para procurar posteriormente os seguintes modos de decaimentos:  $W^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e$  e  $W^- \rightarrow e^- + \nu_e$  ( $e^+$  é o pósitron, a antipartícula do elétron). Dados foram tomados ininterruptamente durante trinta dias, no final de 1982, e observaram um bilhão de colisões, gravando um milhão em fitas magnéticas, das quais os computadores selecionaram 2.125 eventos. A precisão com que os traços das partículas são reconstruídos pelos computadores é impressionante. Sob análise cuidadosa, esses eventos reduziram-se a 39 e, finalmente, cinco deles mostravam ao mundo a existência dos  $W^\pm$ !

O  $Z^0$  foi descoberto em meados de 1983, observando outros modos de decaimento:  $Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$  e  $Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ . O

$Z^0$  decai de muitas formas diferentes, inclusive nas que incluem neutrinos; esse comportamento está intimamente



ligado a uma relação simples, que pode ser deduzida da teoria eletrofraca, entre a vida média do  $Z^0$  e o número de possíveis tipos de neutrinos existentes na natureza. Na linguagem do físico, o número de gerações dos léptons! Veja que informação importante: teoricamente, o número de gerações é igual a três. Isso significa que há só três tipos de neutrinos. Para observar o  $Z^0$  mais a fundo, um novo acelerador foi projetado. Em 1983, um imenso túnel de 27 km de circunferência começou a ser cavado no CERN para construir o Large Electron Positron ring (LEP), com espaço para quatro enormes detectores diferentes, destinados a observar o resultado das colisões dos dois anéis de matéria e antimatéria. Em 1989, o LEP ficou pronto e, logo na primeira tomada de dados, oito minutos de observação bastaram para a detecção do primeiro  $Z^0$ . No MP, o  $W^+$  e o  $W^-$  ocupam a caixa amarela de baixo e o  $Z^0$  ocupa a caixa amarela acima deles.

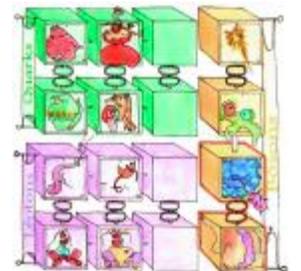


Apesar de o número quântico cor ter sido proposto para resolver o problema do Princípio de Exclusão de Pauli, a razão mais profunda da necessidade desse número quântico extra consiste no fato de a força forte que inter-relaciona os quarks ser mediada pela cor. Em outras palavras, a força entre os quarks tem sua origem na cor. A cor é uma espécie de carga que origina a força forte, da mesma forma que a carga elétrica é fonte da interação eletromagnética.

Da teoria batizada de Cromodinâmica Quântica (QCD), sabe-se que a força forte é transmitida por oito partículas sem massa, eletricamente neutras e de spin 1, chamadas *glúons*, termo que se originou da palavra *glue, cola*, em inglês.



Os glúons mediam a força forte e carregam cor e anticor. Na linguagem do físico, dizemos que, na função de onda do glúon, há um número quântico especificando a cor e outro indicando a anticor. Como há três cores (**vermelho azul verde**) e três anticores ( $\bar{v} \bar{a} \bar{v}$ ), há 9 espécies de glúons diferentes – um octeto (8 glúons obtidos de combinações adequadas dos 9) e um singleto (glúon solitário) que não é importante, pois a soma das cores resulta branco. No MP, os 8 glúons ocupam a caixa amarela abaixo do fóton.

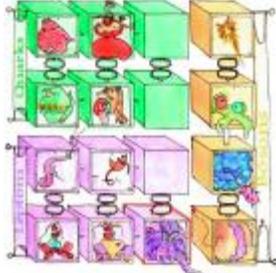


O tau ( $\tau$ ) vem formar a terceira geração de léptons. Já vimos que a família dos léptons acomodava quatro elementos agrupados dois a dois: ( $e^-$ ,  $\nu_e$ ), ( $\mu^-$ ,  $\nu_\mu$ ). No entanto, em 1975, um novo lépton entrou em cena. Em Stanford, Estados

Unidos, o físico Martin Perl, observando o processo no qual elétrons e pósitrons aniquilam-se, fez uma descoberta muito importante. Em meio a tantas partículas, havia muito tempo que não se descobria um lépton. E eis que um lépton genuíno aparece, quase duas vezes maior do que o próton – sua descoberta provocou uma verdadeira surpresa no meio científico. Foi batizado de **tau** ( $\tau$ ), referindo-o à palavra *triton*, que vem do grego e significa o *terceiro*.



Da mesma forma que seus dois irmãos, elétron e múon, o tau apareceu em duas versões: com cargas positiva e negativa. De fato, o  $\tau$  inicia a terceira família de léptons ( $e^-$ ,  $\nu_e$ ), ( $\mu^-$ ,  $\nu_\mu$ ), ( $\tau^-$ ,  $\nu_\tau$ ) dando esperança à existência do neutrino do tau ( $\nu_\tau$ ), sobre o qual falaremos mais adiante. Perl recebeu o prêmio Nobel de 1995 junto com Fred Reines, responsável pela detecção do neutrino em 1956. No MP, o tau ocupa a terceira caixa roxa da primeira linha dos léptons.



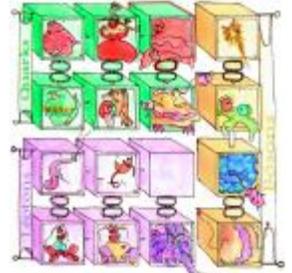
O *bottom* (*b*) foi o quinto quark a ser descoberto. Depois que as primeiras gerações de quarks – (*u*) e (*s*) – tinham sido entendidas, a questão era saber, e testar em laboratório, se quarks ainda mais pesados existiam. Em 1977, Lederman, líder de um grupo do Fermilab, observou a primeira evidência do méson úpsilon [ $Y(1S)$ ], interpretado como um estado ligado de um *bottom* com um *antibottom*, indicando, de fato, uma terceira família de quarks. Esse quinto quark era bem maior do que qualquer partícula já descoberta e foi batizado de *b*. Uns dizem ser *b* de *bottom*, em contraposição a *down*, outros acham que seria *b* de *beauty*, em analogia ao *charm*. Enfim, o nome que pegou foi *b* de *bottom*. No MP *bottom* ocupa a terceira caixa verde da primeira linha dos quarks.



No início da década de 1980, a lista de mésons contendo o quinto quark aumentou de modo significativo, e os físicos teóricos começaram a especular sobre a existência de um sexto quark para completar a simetria. Muitas foram as tentativas de detectá-lo, e o *top* (*t*) foi o último quark a ser descoberto, em 1995. Para se ter uma idéia do seu tamanho, a massa do *top*, que é uma partícula elementar, é da ordem de um átomo inteiro de ouro. Essa partícula só existiu em condições naturais na época do *big bang*. Depois, com o resfriamento do universo, ela deixou de existir e, agora, precisamos de aceleradores que atinjam energias muito altas para recriá-la, mesmo que seja por um brevíssimo instante. Aparentemente, o único acelerador em condições de detectar uma partícula tão pesada seria o Tevatron, no Fermilab. Neste



acelerador subterrâneo de 2 km de diâmetro, que começou a funcionar em janeiro de 1987, tanto o próton como o antipróton eram acelerados de modo a se encontrarem em algum ponto de colisão. Inicialmente foi construído com apenas um detector, o Collider Detector at Fermilab (CDF). Em 1992 surgiu outro detector, chamado DZero. Mais de 900 cientistas de 21 estados norte-americanos e de 12 outros países passaram, então, a colaborar na busca do *top*, e, em 1995, observaram, afinal, o sexto quark, *t* (de *truth* ou *top*). No MP, o *top* ocupa a terceira caixa verde acima do *bottom*.



Note que nosso cartunista representou as partículas respeitando, na medida do possível, uma escala de massas. A relação entre as massas dos quarks e dos léptons permanece até hoje um enorme mistério.

O neutrino do tau ( $\nu_\tau$ ) foi a última partícula a ser descoberta. Depois de o *top* ter sido encontrado em 1995, as simetrias clamavam por um acompanhante-neutrino. Da mesma forma que os outros dois léptons – o elétron ( $e^-$ ) e o múon ( $\mu^-$ ) – tinham seus respectivos neutrinos ( $\nu_e$ ) e ( $\nu_\mu$ ), o tau ( $\tau$ ) também deveria vir acompanhado do seu neutrino ( $\nu_\tau$ ). A busca experimental foi intensa. Iniciou-se oficialmente em 1997, quando físicos que trabalhavam no Tevatron fizeram uso de um feixe intenso que passava por um alvo de 15 m de comprimento, feito de placas de ferro e camadas de emulsão adequadas ao registro dessas interações; o aparato foi chamado Direct Observation of the Nu Tau (DONUT). Apenas um neutrino, de um trilhão deles, interage com um núcleo de ferro e se transforma em um tau que vive só 300 femtosegundos ( $10^{-15}$  s), deixando registrado na emulsão um minúsculo rastro de um milímetro, mas suficiente para garantir a existência da partícula. O DONUT registrou 6 milhões de eventos, dos quais mil foram selecionados pelos computadores – 4 deles exibiam evidências concretas da existência do neutrino do tau! No MP, ele ocupa a caixa roxa acima do tau. Enfim, o zoológico completo!



Resumindo: Há três famílias perfazendo seis léptons. Há ainda seis antiléptons. Juntos, somam doze partículas elementares. Os seis quarks também aparecem em três famílias. As cargas são frações da carga do elétron. Os quarks aparecem em três cores de modo que temos  $3 \times 6 = 18$  quarks. Como há também os antiquarks, juntos somam 36 partículas. Partículas mediadoras: o spin é sempre 1, e as partículas mediadoras dependem do tipo da força em questão. Considerando as forças forte, fraca e eletromagnética temos 8 glúons, 1 fóton,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ . A Tabela 1 resume tudo.

A contagem final nos leva a 60 partículas elementares, número que não deve ser considerado alarmante nem excessivo.

sivo. Fato extremamente intrigante, no entanto, é que para formar a matéria ordinária que nos rodeia precisamos apenas e tão somente da primeira família estável – o elétron (com seu neutrino sempre à sua volta) e os quarks *up* e *down*, que são os formadores básicos dos prótons e nêutrons!

Ah! Não podemos nos esquecer do Higgs – a última partícula elementar que **falta ser encontrada no MP!** A sua verificação experimental é tão importante que um acelerador especial no CERN, chamado Large Hadron Collider (LHC), está sendo construído para procurá-lo (estará em operação em 2007). Um orçamento de bilhões de dólares e mais de 3000 físicos em busca de uma única partícula! Em princípio o Higgs é o responsável pela escala de massas, então vamos promovê-lo e elevar o número total para 61!

A história do Higgs começou em 1964 quando o físico inglês Peter Higgs, da Universidade de Edinburg, Inglaterra, propôs um mecanismo que ficou conhecido por Mecanismo de Higgs, um dos maiores enigmas do MP, e que gera a massa das partículas chamadas bósons mediadores ( $W^\pm$  e  $Z^0$ ). Na década de 1970, com os físicos Weinberg e Salam, aprendemos que, a temperaturas muito altas, da ordem de  $10^{15}$  graus, a força fraca e a eletromagnética constituem, juntas, uma superforça, batizada de força eletrofraca<sup>6</sup>. De certa forma, seriam duas facetas da mesma força. Sabemos que os mediadores dessa superforça são bósons. O bóson que medeia a força eletromagnética é o fóton, que não tem massa, e os bósons que medeiam a força fraca são os  $W^\pm$  e  $Z^0$ , que são massivos! Ora, por que essa falta de reciprocidade?



Essa força eletrofraca é a jóia preciosa do Modelo Padrão e precisa ser entendida em toda a sua extensão. E eis que, em certo momento da origem do universo, essa superforça separa-se, para todo o sempre, em duas. De um lado, a força eletromagnética; de outro, a força fraca. Esse é o momento exato em que o abominável infrator da simetria entra em jogo: o Higgs, e como se fosse uma espécie de rei Midas, atribui massa a tudo o que toca. Antes de o Higgs aparecer, tanto o fóton como os bósons mediadores não eram massivos. Quando o Higgs entra em cena, os  $W^\pm$  e  $Z^0$  adquirem uma notável corpulência, enquanto o fóton continua sem massa. Teoricamente – e com uma margem de erro bem grande –, a massa do Higgs é estimada em  $110 \text{ GeV}/c^2$  (giga eletronsvolts ( $10^9 \text{ eV}$ ) dividido pela velocidade da luz ao quadrado, pois  $E = mc^2$ ). Se ele existir e for descoberto (basta apenas um!), os físicos ficarão muito felizes, porque o modelo padrão terá funcionado maravilhosamente bem, e tudo, enfim, será explicado!... ou melhor, quase tudo...

O Modelo Padrão resiste aos testes experimentais há mais de 30 anos. Mas apesar de todo o seu sucesso, nem tudo está explicado. Ele não responde a diversas perguntas fundamentais: por que as partículas têm massas numa certa hierarquia? Qual seria o mecanismo que privilegia a matéria suprimindo a antimatéria? Como incluir a força gravitacional, que é a quarta interação fundamental<sup>6</sup>, de forma a atribuir o status de partícula ao quantum de interação gravitacional (gráviton)? Seriam as quatro forças da natureza (forte, fraca, eletromagnética e gravitação) simplesmente aspectos diferentes de uma mesma realidade? Uma possível resposta é a teoria de cordas, mas esse já é um assunto que está fora do escopo deste artigo. Para responder a essas perguntas o físico continua o seu trabalho...

Tabela 1. Resumo do número total de partículas elementares do Modelo Padrão.

	Partículas	Antipartículas	Total
Léptons	$e^-, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$ (6)	$e^+, \bar{\nu}_e, \bar{\mu}, \bar{\nu}_\mu, \bar{\tau}, \bar{\nu}_\tau$ (6)	12
Quarks	u, d, s, c, b, t (cada quark pode ter 3 cores) ( $6 \times 3 = 18$ )	$\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$ (18)	36
Mediadoras	$\gamma, W^+, W^-, Z^0, g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8$ (12)	As antipartículas são as mesmas que as partículas	12
<b>Total</b>			<b>60</b>

## Referências

- [1] Abdalla, M.C.B. *O Discreto Charme das Partículas Elementares* (Editora da Unesp, São Paulo, no prelo, previsto para outubro de 2005).
- [2] Ostermann, F. *Um Pôster para Ensinar Física da Partículas na Escola*. Física na Escola, **2**(1), 13-18 (2001).
- [3] Moreira, M.A. *Partículas e Interações*, Física na Escola **5**(2), 10-14, (2004).

## Notas

- <sup>1</sup> Insistimos que o leitor deve ler antes o trabalho de Ostermann (2001) para que os termos léptons, quarks e bósons mediadores, entre outros, passem a fazer parte do vocabulário básico e possibilite uma melhor compreensão deste texto.
- <sup>2</sup> O próton é um férmion pois seu spin é  $1/2$ . No entanto ele não é um férmion fundamental, pois é constituído de partículas ainda menores chamadas quarks.
- <sup>3</sup> O termo *fóton* foi proposto por Gilbert N. Lewis em 1926, onze anos depois de Einstein ter resolvido o efeito fotoelétrico, em uma carta ao editor da revista Nature: "(...) Portanto eu tomo a liberdade de propor para esse átomo novo hipotético, que não é luz, mas

desempenha um papel essencial em todos os processos de radiação, o nome fóton."

<sup>4</sup> Câmara de nuvens: inventada em 1912 por pelo físico escocês Charles Thomson Rees Wilson (premio Nobel de 1927), foi muito utilizada no estudo da radioatividade. Vapor de água é confinado em uma câmara fechada até o ponto de saturação. A pressão é diminuída, produzindo-se ar num estado supersaturado. A passagem de partículas carregadas condensa essa massa de ar em gotículas diminutas de vapor, deixando, assim, os vestígios da partícula que passou.

<sup>5</sup>Em 1963, quando atribuí o nome 'quark' aos constituintes fundamentais dos núcleons, primeiro eu tinha o som da palavra, sem sua grafia, que poderia ser *kwork*. Então, em uma das minhas olhadelas ocasionais em *Finnegans Wake*, de James Joyce, encontrei a palavra quark na frase *Three quarks for Muster Mark!*... Como *quark*, que significa, entre outras coisas, *o pio da gaivota*, tinha a intenção clara de rimar com Mark, assim como *bark* e outras palavras semelhantes, eu tinha encontrado uma desculpa para pronunciá-la como *kwork*. ... De qualquer modo, o número 3 ajusta-se perfeitamente ao modo pelo qual os quarks ocorrem na natureza" (*O Quark e o Jaguar* (Rocco, São Paulo, 1994), p. 194.

<sup>6</sup>Veja mapa conceitual para interações fundamentais em Moreira (2003).



**A**física contemporânea descreve os fenômenos naturais em termos de quatro interações fundamentais que, para efeitos de compreensão em um contexto mais próximo da física newtoniana, podemos pensar como sendo descritas por campos de forças. A força gravitacional e a eletromagnética são as interações fundamentais que se fazem sentir no mundo macroscópico, inclusive em escala humana. As outras duas, a força nuclear forte e a força nuclear fraca, não se revelam em escala macroscópica. Aparecem apenas em escala subatômica - na verdade, como o nome indica, nas escalas nuclear e subnuclear, portanto a distâncias tão pequenas ou ainda menores que o décimo do trilionésimo do centímetro, o que corresponde ao centésimo de milésimo da escala atômica ou à milionésima parte da nanoescala.

A força gravitacional é a responsável pelos movimentos planetários e pela organização da estrutura em larga escala de nosso Universo. A força eletromagnética é a interação que responde pela formação dos átomos, pelas ligações mole-

**Quatro interações fundamentais descrevem todos os fenômenos naturais que observamos. Duas são observáveis no mundo macroscópico (gravitacional e a eletromagnética) e duas apenas em escala subatômica (nuclear forte e nuclear fraca)**

culares e pelos processos biológicos fundamentais, por exemplo. Já a força nuclear forte responde pela coesão dos prótons e dos nêutrons no interior dos núcleos atômicos e pela ligação dos quarks no interior dos hádrons; finalmente, a interação nuclear fraca é a responsável pelos processos radioativos, em que núcleos

atômicos instáveis decaem e emitem partículas.

Cada um destes campos de força é descrito por uma teoria. A força gravitacional, em sua escala macroscópica, é descrita pela mecânica newtoniana, sempre que as velocidades envolvidas forem baixas se comparadas à velocidade da luz; ainda em escala macroscópica, e mesmo cosmológica, mas no regime em que fenômenos relativísticos começam a operar, a descrição do campo gravitacional fica a cargo da teoria da relatividade geral. A descrição microscópica da gravitação, que constitui o que se chama na literatura de gravitação quântica, é um campo de investigação com várias questões ainda em aberto. De fato, abordagens mais recentes como a das teorias de Supercordas são novos encaminhamentos no sentido de, entre outras questões, resolver os problemas da gravitação quântica.

Já a eletrodinâmica quântica descreve os fenômenos que envolvem a força eletromagnética. Foi desenvolvida a partir do início da década de 1940 e ajudou a entender o mundo das chamadas partículas elementares - ou seja, partículas 'indivisíveis'. Trabalhos publicados entre 1961 e 1968 ajudaram a formular a teoria que unificou tanto os fenômenos eletromagnéticos quanto aqueles regidos pela força nuclear fraca. A teoria eletrofraca ou o Modelo de Salam-Weinberg-Glashow - como ficou conhecido - mostrou, portanto,

.....  
**José Abdalla Helayël-Neto**  
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF/MCT) e Grupo de Física Teórica  
José Leite Lopes (GFT - JLL)  
e-mail: helayel@cbpf.br  
.....

---

Neste artigo, procura-se ressaltar e elucidar o papel central das simetrias na construção de modelos e teorias para as interações fundamentais. neste cenário, introduz-se a supersimetria, discute-se o seu conceito, apresentam-se as suas conseqüências e se esclarece o seu papel primordial no programa de unificação dos campos de força da natureza.

que essas duas forças, apesar de se nos apresentarem com características marcadamente distintas, têm uma origem comum, sendo possível propor para elas um cenário de unificação que ilustra como ambas se separam no regime da natureza em que fazemos as nossas observações.

A cromodinâmica quântica (QCD) é a teoria física que incorpora o conhecimento experimental e a fenomenologia das interações nucleares fortes; a sua formulação ficou estabelecida em 1973, com os trabalhos de Gross e Wilczek, e independentemente, de Politzer, o que valeu a estes três autores o Prêmio Nobel de Física de 2004. Esta é uma teoria que ainda ocupa uma parte considerável da comunidade dos teóricos e apresenta desafios estimulantes a serem esclarecidos, como por exemplo a resolução do problema do confinamento dos quarks e glúons no interior dos hádrons, o desenvolvimento de técnicas matemáticas e computacionais para os chamados cálculos não-perturbativos e a compreensão da teoria incluindo efeitos de temperatura finita, a fim de compreender o seu rico diagrama de fases.

Neste cenário das quatro interações fundamentais devidamente organizadas em termos de teorias microscópicas, que incorporam tanto as leis do mundo quântico quanto a teoria da relatividade especial, percebe-se que o conceito-chave para a formulação das mesmas é o conceito de simetria, e, ao lançar mão da idéia de simetria, as teorias de Yang-Mills, propostas em 1954, estabelecem o referencial teórico para a formulação de todas as teorias acima mencionadas. Do ponto de vista matemático, cada interação tem associado a si um grupo de simetria, estrutura matemática que obedece a um conjunto de regras bem específicas; no que diz respeito às características de cada campo de força, o grupo de simetria organiza e sistematiza grandezas de natureza física como as cargas e as correntes envolvidas na interação. Os fenômenos eletromagnéticos são descritos em termos de um grupo de simetria designado por  $U(1)$ , associado à carga elétrica; a fenomenologia das interações fracas acomoda-

da-se na estrutura imposta pelo grupo  $SU(2)$ , que responde pelo chamado isospin fraco; a QCD é formulada em termos do grupo  $SU(3)$ , que descreve a carga de cor e, finalmente, o grupo subliminar à gravitação é o  $SO(1,3)$ , conhecido como o grupo de Lorentz, associado a uma grandeza intrínseca das partículas elementares, a que nos referimos como spin.

O conceito de simetria e a estrutura algébrica a ela correspondente organiza as leis de conservação associadas a um dado tipo de interação, sistematiza a classificação das partículas e dos estados físicos da teoria em termos de especificações bem precisas - os chamados números quânticos - e estabelece mecanismos para a compreensão das relações existentes entre as massas e cargas das partículas envolvidas na interação considerada. Entretanto, estas relações de massa envolvem exclusivamente bósons (partículas de spin inteiro) ou férmions (partículas com spin semi-inteiro e que obedecem ao chamado Princípio da Exclusão de Pauli); as simetrias usuais não inter-relacionam, contudo, os setores bosônico e fermiônico. É exatamente neste ponto, a compartimentação bóson-férmion, que a Supersimetria faz a sua entrada na cena das interações fundamentais.

E, muito interessante também, é se observar que foi exatamente em 1973, quando as teorias específicas para cada interação ficaram estabelecidas, que se inaugurou a era da Supersimetria como conceito fundamental no projeto de construção de uma teoria de unificação dos quatro campos de força da natureza, tendo o propósito, inclusive, de viabilizar um ambiente teórico para a consolidação de uma teoria quântica para a gravitação.

A Supersimetria coloca férmions e bósons no mesmo patamar, e, na proposta de ser uma simetria do espectro de partículas físicas (entretanto, é preciso deixar claro que ainda não foi detectada experimentalmente), propõe que bósons e férmions possam figurar no

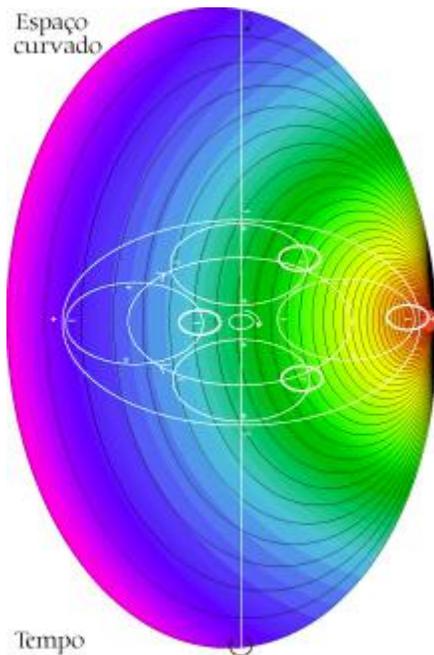
mesmo grupo de partículas degeneradas em massa, ou que, caso venham a ter massas muito próximas, que esta diferença possa ser reproduzida em termos de um mecanismo de violação da Supersimetria. Em um mundo regulado pelas leis da Supersimetria, a cada bóson de uma certa massa corresponderia um férmion com a mesma massa. Não é esta a situação que encontramos no mundo a nós acessível das partículas verdadeiramente elementares. Mas a idéia é que isto deva ocorrer em uma escala de altíssimas energias, ainda muito afastadas do regime de energia a que temos acesso experimental.

A partir da premissa de que existe um princípio de simetria segundo o qual bósons e férmions possam ser degenerados em massa é que se desenvolveu fortemente a Supersimetria na comunidade da física teórica de altas energias; em 1975, já eram conhecidas as ditas extensões supersimétricas da eletrodinâmica quântica e das teorias de Yang-Mills, em cujo contexto são descritas as interações nucleares fortes e fracas. Em 1976, conseguiu-se chegar à formulação supersimétrica da gravitação, em uma teoria denominada Supergravidade, que trouxe uma compreensão mais aprofundada de como deve ser a interação gravitacional no mundo microscópico.

Em todas estas teorias, a idéia de que a interação seja mediada por um bóson intermediário fica, agora com a Supersimetria, acrescida da presença de férmions parceiros dos bósons mediadores, também conhecidos



Visão artística dos eventos dentro de uma câmara de bolhas.



A supersimetria, em sua proposta de unificar férmions e bósons, traz naturalmente consigo uma descrição do campo gravitacional, e sua versão específica para o mesmo é a supergravidade, onde tempo e espaço se unificam em um cenário espaço-temporal mais amplo, o chamado superspaço.

como bósons de gauge. No caso da eletrodinâmica, o fóton é acompanhado do férmion neutro denominado fotino; no contexto das interações fracas, os bósons carregados  $W$  e o bóson neutro  $Z$  são acompanhados dos férmions chamados  $W$ -inos e  $Z$ -ino. Os parceiros supersimétricos dos glúons da QCD são conhecidos como glúinos e, como parceiro do gráviton, partícula de massa nula e spin  $-2$  (o *quantum* da interação gravitacional) aparece o gravitino, férmion eletricamente neutro com spin  $-3/2$ . Nenhum destes parceiros supersimétricos é degenerado em massa com o bóson que acompanha; por exemplo, o fotino e o gravitino não são partículas de massa de repouso nula, como o fóton e o gráviton.

Isto impõe que a maneira de se introduzir a Supersimetria nas teorias de interações fundamentais, de forma compatível com a realidade experimental de que dispomos, é através dos chamados mecanismos de quebra. Propõe-se que a Supersimetria tenha operado no Universo em seus instan-

tes iniciais e que, com o resfriamento do mesmo, esta simetria entre bósons e férmions tenha sido quebrada (existem mecanismos específicos e independentes para se implementar a violação da Supersimetria) de tal forma que, em seu regime atual, as partículas introduzidas pela Supersimetria no espectro físico tenham suas massas em uma escala acima da escala acessível aos experimentos atuais de altas energias. Isto significa que os "inos" devem estar todos localizados na escala do TeV, ou seja, uma ordem de grandeza acima da escala fixada para a separação das interações fracas dos setores eletromagnético e forte, o que ocorre na faixa das centenas de GeV. Apenas para efeito de referência, a energia de repouso do próton é de 0.938 GeV.

A Supersimetria também tocou questões teóricas muito relevantes, como o atenuamento das divergências (quantidades infinitas) no regime ultravioleta (região de altíssimas energias) das teorias quânticas de campos, essenciais para a descrição das interações fundamentais, e culminou com uma teoria de gravitação com mais possibilidades de consistência do que a gravitação quântica tradicional; além desta notável realização, a Supersimetria possibilitou a formulação da primeira classe de teorias quânticas de Yang-Mills livres de qualquer tipo de divergência ultravioleta, concretizando uma grande expectativa de Dirac, que sempre sustentava que uma teoria quântica viável deveria ser absolutamente finita. Também, na sua busca por uma teoria de unificação dos diferentes campos de força, a Supersimetria resolve alguns problemas fundamentais de consistência que o programa usual de unificação enfrenta.

Os dez primeiros anos de desenvolvimentos em Supersimetria (1974-1984) foram marcados pela incorporação desta simetria na física de partículas, no programa de unificação e no projeto de construção de uma teoria matematicamente consistente para a gravitação. Vários modelos de Supergravidade foram propostos e a célebre Supergravidade-  $N = 8$ , com uma série de mecanismos agregados,

figurou, por certo tempo na literatura, como o paradigma da teoria mais propícia para a unificação das interações fundamentais.

A segunda fase, iniciada em 1985, já nos apresenta a Supersimetria em uma outra perspectiva, colocando-a na qualidade de um ingrediente físico e matemático necessário para a construção das teorias de Supercordas - nesta visão, genuínas teorias fundamentais - as quais, se espera, possam propiciar o cenário que viabilize o programa de unificação, incorporando o setor gravitacional, descrito, neste novo panorama, por uma teoria quântica consistente para a gravitação. A Supersimetria foi, assim, definitivamente incorporada à física de partículas e vem sendo, de forma crescente, aplicada também a outros campos da Física, como a física nuclear, a física da matéria condensada e, até mesmo, a alguns sistemas biofísicos. Seria bastante oportuno ainda mencionar que sistemas quanto-mecânicos muito simples, como aqueles constituídos por partículas, carregadas ou neutras, e sujeitas a certas configurações de campo magnético externo, exibem características de uma supersimetria que se revela como uma simetria dinâmica. Esta é uma indicação de como a Supersimetria possa ser subjacente a interessantes sistemas quânticos realísticos. Finalmente, com a entrada em operação do *large hadron collider* (o LHC), a partir de 2007-2008, espera-se dispor de recursos experimentais suficientes para a busca e a identificação de partículas supersimétricas (o que seria um teste direto da Supersimetria) e de outras consequências indiretas da presença da Supersimetria no mundo físico, reforçando o seu marcante papel na formulação das teorias fundamentais para a descrição dos campos de força da natureza.

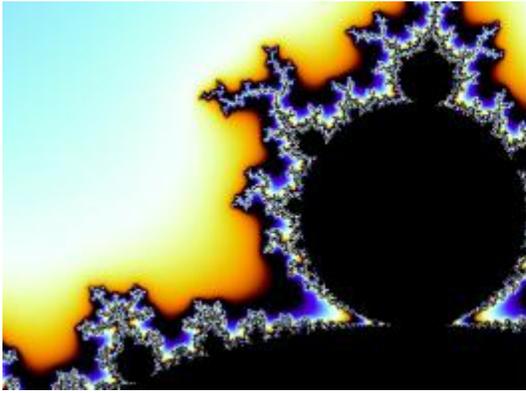
### Saiba mais sobre supersimetria

<http://web.mit.edu/afs/athena.mit.edu/user/r/e/redingtn/www/netadv/ssym.html>

<http://www.supersymmetry.com/>

<http://www1.imperial.ac.uk>

<http://www.ocf.berkeley.edu>



# A Ciência da Complexidade

.....  
**Rita M.C. de Almeida**

Instituto de Física, Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul,  
Porto Alegre, RS  
e-mail: rita@if.ufrgs.br  
.....

**A** Ciência, bem antes da Complexidade, representou um avanço significativo para a humanidade. Isto porque podemos pensar a Ciência como o mais eficiente método de se obter conhecimento.

Antes do método científico, introduzido por Galileu (1564-1642), entre os critérios para aceitação da validade de uma teoria, hipótese ou suposição, estava o critério da Autoridade, segundo o qual a teoria deveria ou não ser aceita dependendo de quem a propunha ou defendia. Resumidamente, Galileu propôs que, deixando de lado o critério da Autoridade, se fosse indagar diretamente à Natureza se a teoria era correta ou não. Em outras palavras, que se fizessem experimentos para verificar a veracidade das previsões da teoria. E propôs um método pelo qual estes experimentos fossem conclusivos e repetíveis por outros investigadores. Isso soa mais como uma questão de bom senso do que como uma revolução no pensamento científico. No entanto, esse bom senso punha em cheque autoridades da época, como a Igreja Católica. E incitava pensamento independente, criatividade, críticas, tudo aquilo que leva à rebeldia.

No final da estória, o método científico prevaleceu no ocidente apesar dos contras e vimos o Iluminismo florescer, resultando em desenvolvimento científico e tecnológico refletidos nas revoluções industriais e

nos avanços da Ciência como um todo. Quais as condições sociais e materiais que possibilitaram a vitória do Iluminismo é uma questão longe de estar fechada, mas que um mínimo de liberdade de pensamento e expressão foram necessárias, está fora de cogitação [1].

Como oposto ao método científico de obtenção de conhecimento, podemos encontrar formas diversas em que metáforas não justificadas propõem algumas maneiras de como sistemas naturais ou todo o Universo funcionam. Algumas destas explicações não são mais aceitas hoje em dia devido à divulgação de resultados de investigações científicas e tecnológicas. Por exemplo, após as fotografias tiradas via satélite, poucas pessoas poderiam aceitar um modelo da Terra plana. Após a descoberta dos fósseis de dinossauros e da datação destes como tendo vivido há várias dezenas

de milhões de anos atrás, fica mais difícil acreditar que literalmente a Terra e o Universo tenham sido criados há apenas pouco mais que 6 mil anos.

A Ciência, como se desenvolveu até meados do século XX, conseguiu ex-

plicar muitos fenômenos que hoje poderiam ser descritos como não complexos, propondo modelos matemáticos analiticamente tratáveis. Fenômenos como organismos vivos, ecossistemas ou o funcionamento da mente humana revelaram-se muito complexos para que os tratemos da

**Galileu propôs que, deixando de lado o critério da Autoridade, se fosse indagar diretamente à Natureza se a teoria era correta ou não. Em outras palavras, que se fizessem experimentos para verificar a veracidade das previsões da teoria**

---

Durante um longo período, a Ciência avançou modelando sistemas naturais que podem ser descritos com poucas variáveis ou propondo descrições - mas não explicações - para fenômenos mais complexos. Neste artigo discutimos como a ampla disseminação de recursos numéricos poderosos através de computadores pessoais possibilitou o desenvolvimento e investigação de modelos matemáticos através dos quais é possível modelar fenômenos naturais onde i) o detalhe determina a evolução do sistema, tornando imprescindível a descrição do sistema através de muitas variáveis e ii) onde indeterminismo aparente pode ser modelado.

mesma maneira. Eles apresentam qualidades como não linearidade, dependência crítica das condições iniciais, amplificação por retro-alimentação, etc., que tornam a solução analítica muito difícil, senão impossível. Na verdade, certas qualidades globais destes sistemas, como a dependência forte nos detalhes de sua história, ou a imprevisibilidade operacional do seu comportamento, levaram muitos pensadores a concluir que, nesses casos, uma explicação do seu comportamento através de uma teoria geral seria impossível e tudo o que se poderia fazer seriam classificações taxonômicas. Aristóteles dizia que “a Ciência termina onde começa a natureza”.

Assim, durante um longo período de tempo, sistemas complexos, que apresentam diferenças qualitativas em relação àqueles sistemas que são solúveis analiticamente, permaneceram sem uma modelação matemática adequada. Na falta disso, metáforas foram tentadas e algumas delas pareciam explicar melhor tais fenômenos. Explicações mágicas da Natureza em que holismos, propósitos e consciências bem ou mal intencionadas são introduzidos, foram apresentadas como mais eficientes na explicação da Natureza. Talvez naquela data assim o parecessem. Em todo o caso, elas nunca passaram pelo teste de uma verificação mais rigorosa [2].

Hoje, com o advento de computadores suficientemente rápidos, tais sistemas já podem ser modelados, pelos menos em suas formas mais simples, e muitos resultados têm sido obtidos. O surpreendente é que as bases científicas são as mesmas, isto é, nenhuma lei da Física foi desrespeitada, reescrita ou reinterpretada. O que aconteceu é que equações que já haviam sido propostas estão sendo agora resolvidas e suas soluções apresentam resultados inesperados. E, ainda, tais soluções incentivaram novas descrições, possibilitaram novos pontos de vista, que, por sua vez, geraram novos resultados. Na realidade, a Ciência da Complexidade não é uma nova Ciência, mas sim novos resultados para a mesma Ciência Natural. Por outro lado a Matemática sim, que

não é uma Ciência Natural, pode gerar novas fronteiras, como por exemplo a geometria fractal [3].

### O complexo vs. o simples: Maneiras de comprimir a informação

Uma maneira possível de se apresentar a Ciência é considerar que a Natureza nos fornece uma infinidade de dados através de nossas percepções, com ou sem o auxílio de aparelhos de medida, os quais são classificados e então são extraídas previsões. A priori, não temos como ter certeza de que os acontecimentos que se sucedem diante de nós estejam de alguma forma correlacionados. No entanto, depois de haver deixado cair várias vezes o bico no chão, mesmo um bebê chega à conclusão de que, quando o bico é solto, ele cai. Assim, o ser humano está dotado com esta capacidade de inferir leis de causalidade a partir de exemplos repetidos de fenômenos naturais. O método científico consiste em uma maneira eficiente de testar a natureza para verificar se as inferências, as hipóteses levantadas, são corretas e se suas conseqüências (previsões) se confirmam.

Quando uma teoria é aceita, isto significa que nós podemos prever o resultado de um experimento antes de realizá-lo e, se a nossa fé no modelo é forte, nem precisamos realizar o experimento. Ou então, até arriscamos a nossa vida apostando no resultado do modelo, como o fazem as pessoas que, por exemplo, andam de avião. Isto necessariamente implica que a *informação foi comprimida*.

Como um exemplo concreto dessa compressão da informação, considere que estamos realizando um experimento em que entramos com um valor  $X$  de uma quantidade qualquer (por exemplo, a massa de um corpo) e obtemos o valor de uma quantidade  $Y$  (por exemplo, o peso do corpo). Os dados poderiam ser resumidos pela Figura 1.

Se não for feita nenhuma inferência sobre o fenômeno que estamos estudando, um novo experimento deve ser realizado para qualquer novo valor de  $X$ . E para cada valor de  $X$ ,

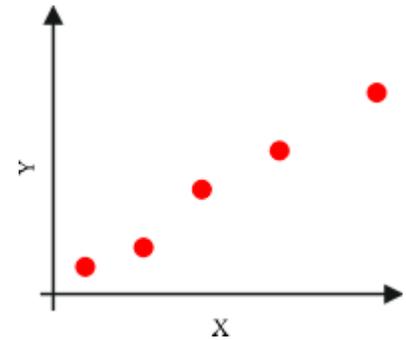


Figura 1. Gráfico representando as medidas conjuntas das variáveis  $Y$  e  $X$

temos um valor de  $Y$ . Contamos com uma lista, uma tabela de valores de  $X$  e  $Y$  associados. Como os possíveis valores de  $X$  são infinitos, precisamos de uma tabela infinita! Mas existe alguma regularidade no gráfico apresentado acima; podemos aproximadamente descrever os pontos como pertencendo a uma reta (Figura 2).

A vantagem é que retas podem ser descritas por equações com duas constantes:

$$Y = aX + b \quad (1)$$

A partir do gráfico, pode-se encontrar os valores de  $a$  e  $b$ . Tendo estes valores, a partir de qualquer valor de  $X$ , pode-se então obter  $Y$ . Se o modelo estiver correto, não precisamos mais realizar o experimento para todos os  $X$  para obter o  $Y$  correspondente, basta usarmos a Eq. (1). Toda a informação contida na lista infinita fica agora *comprimida* nos valores das duas constantes  $a$  e  $b$ , mais o conhecimento que estes pontos são modelados por uma reta. O teste para este modelo seria então comparar a predição do valor de  $Y$  para um  $X$  ainda não

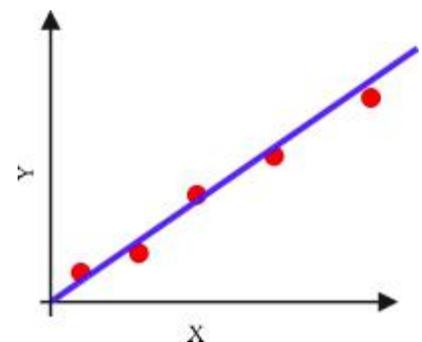


Figura 2. Gráfico onde uma reta é proposta como um modelo para descrever a correlação entre as variáveis  $Y$  e  $X$ .

experimentado com o resultado experimental (observe que uma teoria pode ser refutada por uma predição errada, mas uma predição correta não assegura que as futuras também o serão).

As teorias (ou modelos) da Natureza nunca são exatas. São sempre aproximações em que alguns fatores foram simplificados ou simplesmente desprezados. Se os efeitos destes fatores forem pequenos, dentro de uma margem de erro previamente estipulada como aceitável, o modelo ainda funciona. Por exemplo, na Figura 2, os pontos não caem exatamente em cima da reta, mas ainda assim a reta 'modela' o comportamento destes pontos. Outra maneira de se modelar seria procurar outra curva que passasse pelos pontos experimentais. Assim, o modelo destes pontos seria o conjunto de parâmetros necessários para determinar a curva, mais a especificação da curva (reta, parábola, etc.).

Este foi um exemplo simples. A Ciência está sempre procurando uma maneira matemática de comprimir a informação. Os fenômenos naturais podem ser muito complicados e sempre fica a dúvida se são ou não passíveis de uma modelação, isto é, se o número de constantes necessárias para encontrar a descrição matemática de um dado fenômeno não seria tão extensa quanto a lista dos dados de entrada e resultados experimentalmente obtidos. Por outro lado, poderia

o número destes parâmetros ser reduzido se uma curva mais adequada fosse considerada? Quais tipos de curvas estão disponíveis para o modelador? Na prática não são somente curvas, mas, de uma forma mais geral, sistemas dinâmicos

(receitas de como gerar as curvas) é quem são propostos como modelos.

Este ponto, se a Natureza é modelável ou não, é muito importante para a Ciência. Diferentes disciplinas discutem-no mais ou menos intensa-

mente. E à medida que o tempo vai passando, cada vez mais são propostas novas formas de se olhar para a Natureza, novas maneiras de se modelar, originárias de progressos na Matemática, e novas ferramentas de trabalho, viabilizadas pelo desenvolvimento de computadores pessoais. Assim, as informações contidas nas observações da Natureza são cada vez mais comprimidas em um conjunto (pequeno) de parâmetros, mais a especificação do tipo de sistema dinâmico que se está considerando.

O que possibilitou a modelação de sistemas mais complicados foi a ampliação drástica da 'biblioteca' de diferentes sistemas dinâmicos analisáveis disponíveis. Analisáveis significa que de uma maneira ou outra pode-se re-

solver estes sistemas dinâmicos (que são geralmente um conjunto de equações matemáticas) e classificar suas soluções. E são estas soluções que podem apresentar características surpreendentes, como fractalidade, dependência crítica das condições iniciais ou efeitos não lineares, isto é, pequenas mudanças nos parâmetros das equações provocando grandes mudanças nas soluções.

Essas soluções, obtidas para sistemas dinâmicos determinados por poucos parâmetros, podem ser bem complicadas. Este é um ponto interessante para a Ciência. Isto significa que

por trás de um conjunto complicado de dados, pode haver um sistema dinâmico que é determinado por poucos parâmetros - podemos modelar sistemas complicados! Assim, hoje em dia, sistemas que antes eram preferencialmente *descritos* (equivalente à lista de entradas e saídas) passaram a ser *modelados*. Freqüentes exemplos são encontrados entre sistemas biológicos e sociais: genética de populações, o problema predador-presa, teoria de jogos, etc.

No que segue mostraremos alguns exemplos em que equações simples podem gerar soluções complicadas.

### Exemplo 1: A equação logística e o caos determinista

O caos determinista é uma importante aquisição para a 'Biblioteca de Modelos Analisáveis', onde estariam todos os modelos matemáticos possíveis que os modeladores poderiam utilizar para descrever os sistemas naturais. Isto ocorre porque estes modelos resolvem um conflito antigo para os cientistas: existem sistemas naturais que são modelados por equações que são essencialmente determi-

nistas, mas que vêm frustrando toda a tentativa de se fazer previsões corretas sobre o seu comportamento

em tempos mais longos. Um exemplo é o clima.

O que as soluções destes sistemas matemáticos que descrevem caos determinista apresentam é uma dependência crítica nas condições iniciais. Isto significa o seguinte: suponha que estamos observando um sistema em um dado instante, por exemplo, uma pequena partícula que se locomove no espaço. Esta partícula descreve uma trajetória em tempos subsequentes. Suponha que possamos repetir exatamente a experiência, inclusive a ação do meio externo sobre a partícula, mas dessa vez deslocamos um pouquinho do ponto inicial. Tão pouquinho que só pudéssemos notar a diferença com a ajuda de uma lupa. Duas coisas podem acontecer: i) a segunda trajetória é quase igual à primeira, e somente com uma lupa poderíamos notar a diferença das duas para qualquer tempo, ou ii) a segunda trajetória fica notavelmente diferente da primeira. Neste caso, um observador sem lupa poderia chegar à conclusão que coisas diferentes podem acontecer para uma situação inicial indiferenciável e, portanto, não se pode prever a trajetória a partir da condição inicial. Isto é indeterminismo. Por outro lado, para um observador poder prever qual a trajetória seguida pela partícula, ele tem que ser

**A Ciência está sempre procurando uma maneira matemática de comprimir a informação**

**As teorias da Natureza nunca são exatas. São sempre aproximações em que alguns fatores foram simplificados ou simplesmente desprezados. Se os efeitos destes fatores forem pequenos, dentro de uma margem de erro previamente estipulada como aceitável, o modelo ainda funciona**

capaz de distinguir as duas posições iniciais, isto é, tem que ser capaz de medidas com grande *precisão*. Na realidade, para que as trajetórias de um sistema no regime caótico não diverjam *nunca*, é necessário *precisão infinita*. Por exemplo, especificação das condições iniciais através de números com infinitas casas decimais. O que, na prática, não é possível. Assim, embora sistemas caóticos sejam deterministas em princípio, não podemos prever comportamentos na prática, porque condições iniciais com precisão infinita podem não ser possíveis.

Em todo o caso, o fato de não se poder descrever com exatidão as trajetórias não significa que informações úteis não possam ser extraídas das soluções. Usualmente estas trajetórias caóticas são um número bem menor do que todas trajetórias que se podem imaginar, e compartilham algumas características. O que este resultado nos aponta é que diferentes aspectos, que não a trajetória em si, são relevantes de ser medidos - aqueles comuns às trajetórias caóticas.

Talvez o exemplo mais simples de um sistema caótico seja o mapa logístico, dado por

$$X_{t+1} = 1 X_t (1 - X_t), \quad (2)$$

para  $0 \leq X \leq 1$ .

Esta equação significa que toma-

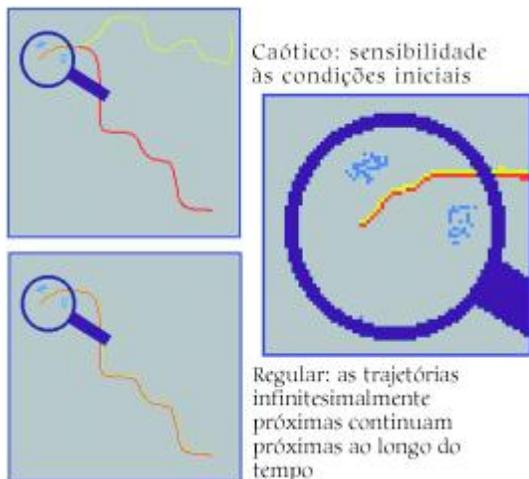


Figura 3. Representação esquemática da dependência das condições iniciais. Iniciando de pontos diferentes, mas muito próximos, as trajetórias descritas podem i) continuar próximas, caracterizando um comportamento regular ou ii) separar-se exponencialmente no tempo, caracterizando um regime caótico.

mos um valor inicial  $X_0$ , calculamos  $X_1$  através da equação acima, calculamos então  $X_2$  a partir de  $X_1$  e assim sucessivamente. Essa operação está representada na Figura 4, para dois valores diferentes de  $\lambda$ .

O ponto onde a reta verde deixa o eixo horizontal representa  $X_0$ . Seguindo verticalmente até a curva cor de rosa, encontramos  $X_1$ , representado pelo valor do eixo vertical neste ponto. Seguindo horizontalmente até a reta azul, onde  $Y = X$ , e então subindo pela vertical verde até a curva cor de rosa novamente, encontramos  $X_2$ . E assim sucessivamente, vamos obtendo a trajetória definida por  $(X_0, X_1, X_2, X_3, \dots)$ . Na figura superior, para pequenos  $\lambda$ , este processo acaba levando-nos a um ponto fixo  $X_{fixo}$ , para o qual

$$X_{fixo} = \lambda X_{fixo} (1 - X_{fixo}) \quad (3)$$

e portanto  $X_{t+1} = X_t$ .

Repetindo este processo para valores maiores de  $\lambda$ , depois de muitas iterações, o sistema pode oscilar entre dois valores, ou entre quatro valores, e, à medida que  $\lambda$  cresce, o período de oscilação vai duplicando até que para um valor crítico  $\lambda_c$ , o sistema entra em caos, isto é, não há um limite definido para  $X_{t \rightarrow \infty}$  e o sistema pula de um valor para outro sem uma lógica aparente. Este processo está representado na gráfico inferior da Figura 4.

Esta equação fornece o modelo mais simples que se tem para o crescimento limitado de populações biológicas. Mas o que ela nos ensina é que uma equação bastante simples pode apresentar soluções bastante complicadas, no sentido que  $X$  evolui de um valor para outro de uma maneira aparentemente aleatória. E que pequenas mudanças no valor de  $X_0$  pode levar a trajetórias que divergem - levam a resultados diferentes. Toda a informação contida na lista infinita de posições sucessivas de uma traje-

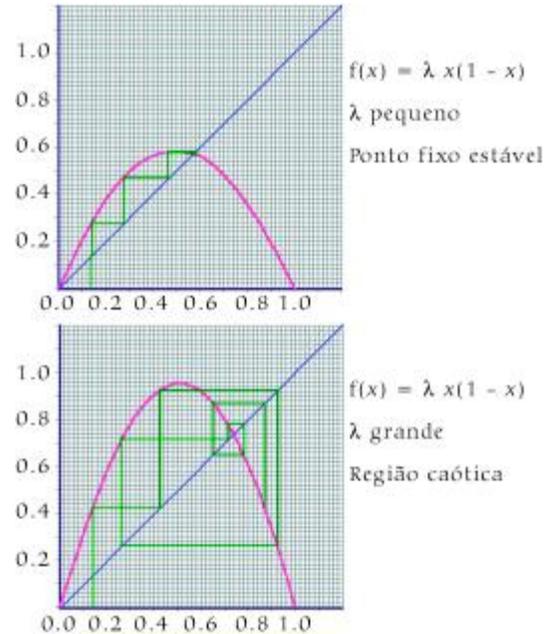


Figura 4. Representação de iterações sucessivas do mapa logístico (ver texto). A trajetória pode convergir para um ponto fixo (gráfico superior) ou então descrever uma trajetória que não converge (gráfico inferior), dependendo do parâmetro  $\lambda$  que está associado à altura máxima da curva em rosa.

tória caótica está contida na informação que a equação de evolução é o mapa logístico, e nos valores de  $\lambda$  e  $X_0$ .

### O conjunto de Mandelbrot: Uma estrutura fractal

Um exemplo fascinante onde estruturas muito complicadas podem ser geradas por uma equação simples com poucos parâmetros é dado pelo conjunto de Mandelbrot. Benoit Mandelbrot é um matemático belga que inventou a geometria fractal [3].

Para obtermos o conjunto de Mandelbrot, temos que definir um mapa de evolução, como na seção anterior. Com uma diferença: as variáveis são complexas. Isto significa que cada variável é composta de duas partes, uma real e outra imaginária. Tipicamente, um número complexo  $Z$  é escrito como

$$Z = a + b i \quad (4)$$

onde  $a$  e  $b$  são números reais, e  $i$  é a raiz quadrada de  $-1$ . As 4 operações aritméticas podem ser definidas para estes números, bem como potenciação e radiciação. Um ponto interessante é que estes números têm que ser representados por dois valores indepen-

dentes e, portanto, localizam-se sobre um plano e não sobre uma reta. Cada ponto em um plano, então, pode representar um número complexo  $Z$  e a distância deste ponto à origem é definida como o módulo de  $Z$ .

Podemos definir a equação de iteração

$$Z_{t+1} = (Z_t)^2 + C \quad (5)$$

onde  $Z_t$ ,  $Z_{t+1}$  e  $C$  são números complexos. Para construir o conjunto de Mandelbrot, procedemos da seguinte maneira. Tomamos um valor de  $C$  fixo e iteramos a Eq. (5) a partir de  $Z_0 = 0 + 0i$ . Se o módulo de  $Z_{t \rightarrow \infty}$  permanece finito, isto é, não cresce sem limites, então este valor de  $C$  pertence ao conjunto de Mandelbrot. Varrendo todos os valores de  $C$ , isto é, para todos os valores possíveis para as partes real e imaginária de  $C$  e pintando de preto os pontos  $C$  que pertencem ao conjunto de Mandelbrot, obtemos a Figura 5. As diferentes cores fora do núcleo preto relacionam-se com o número de iterações necessárias para  $Z$  estar fora da tela.

Esta já é certamente uma figura complicada. Porém o grau de detalhe na superfície do conjunto de Mandelbrot (interface entre o preto e o vermelho) é infinita. Podemos escolher

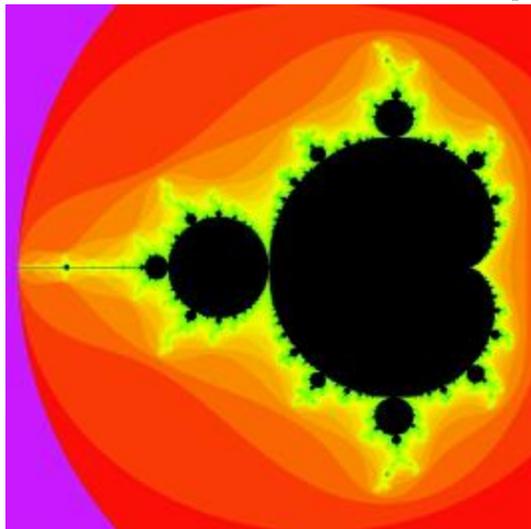


Figura 5. Gráfico no plano representando as componentes real e imaginária do parâmetro  $C$  de um mapa de Mandelbrot (ver texto). Os pontos em preto representam valores de  $C$  para os quais sucessivas iterações do mapa não divergem (vão ao infinito). As diferentes cores estão associadas ao número de iterações necessárias para que o resultado do mapa apresente módulo maior que 2 (o que garante a divergência).

diferentes regiões da superfície e dar 'zooms' para melhor vermos os detalhes. Na realidade, podemos dar zoom dentro de zoom, dentro de zoom, sem parar. O nível de detalhes nunca diminui. Esta é a característica mais marcante de estruturas fractais, e a chamamos de invariância de escala.

Alguns destes exemplos estão nas Figuras 6 a 8. As Figuras 6 e 7, em especial, repetem o conjunto de Mandelbrot depois de várias magnificações. Elas próprias também contêm regiões que após mais magnificações repetirão este mesmo padrão. Toda esta riqueza de detalhe está contida na informação de que o mapa de iteração é dado pela Eq. (5) e que pontos  $C$  que levam de  $Z_0 = 0$  a  $Z_{t \rightarrow \infty}$  limitados devem ser pintados de preto.

### Conclusões

A aquisição de conhecimentos a partir de dados fornecidos pelo meio que nos cerca é uma capacidade inata do ser humano e certamente foi vantajosa para a sobrevivência de nossa espécie. A Ciência moderna trata dos conhecimentos adquiridos através de um método eficiente e seguro e descarta o critério da Autoridade.

Sempre que possível os cientistas tentam comprimir a informação adquirida em experimentos em leis matemáticas, de forma a descrever e explicar a Natureza. Assim, modelos matemáticos são propostos não só com o intuito de reproduzir experimentos já realizados, mas também de prever resultados para situações ainda não vivenciadas. Alguns sistemas na Natureza são muito complicados e fornecem dados experimentais que parecem aleatórios e sem correlação visível. Estas características tornaram impossível modelarmos matematicamente tais sistemas através de técnicas existentes antes dos computadores. Com o surgi-

mento dos computadores, muitos outros modelos matemáticos puderam ser resolvidos de uma forma ou de outra, e a 'Biblioteca de Modelos Analisáveis' aumentou consideravelmente, possibilitando a investigação de sistemas naturais mais complexos. As conseqüências extrapolam o meio acadêmico, vivenciado principalmente por cientistas e estudantes, porque os resultados destes modelos matemáticos têm características que não se esperava que

pudessem apresentar.

Notemos primeiramente o fato de que sistemas com comportamentos complexos podem ser modelados por equações com poucos parâmetros. Isto significa que a informação contida em comportamentos complexos pode ser comprimida e, também, que pode ser explicada e não apenas descrita. Novas fronteiras para a Ciência!

Também, vimos que equações deterministas podem apresentar soluções não previsíveis na prática. Desse modo, modos alternativos de se explicar os resultados, assim como o grau de incerteza nas previsões, devem ser definidos. Isto implica em uma atitude diferente frente a sistemas complexos naturais: nem a confiança cega de que podemos fazer alguns cálculos e então prever o futuro do sistema com exatidão, nem a atitude nihilista de que nada podemos saber a respeito e portanto não existe porque interferirmos na evolução ou tentarmos uma explicação para estes sistemas.

Os sistemas simples são a exceção na Natureza. Os complexos são a regra geral. A complexidade aparece quando o grau de interação entre os vários componentes do sistema é suficientemente alto para que a análise do sistema em subsistemas não faça mais sentido. Nos modelos matemáticos isto é reconhecível. E na vida real também. Assim, ao avaliarmos situações do dia-a-dia, devemos estar alertas para o fato de que a interconexão de diferentes

**Modelos matemáticos são propostos não só com o intuito de reproduzir experimentos já realizados, mas também de prever resultados para situações ainda não vivenciadas**

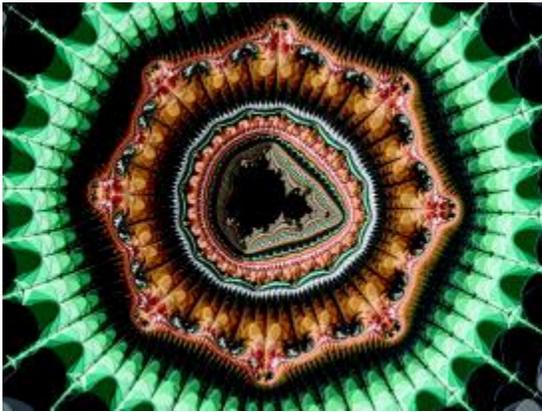


Figura 6.

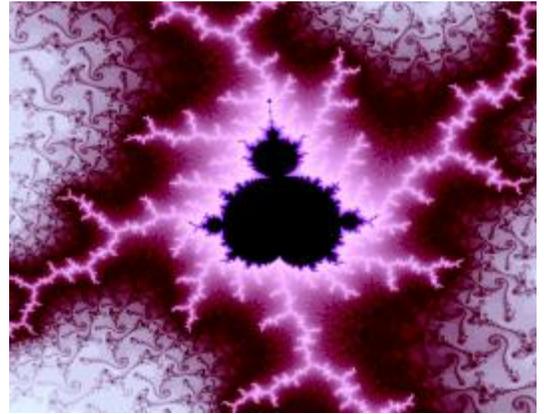
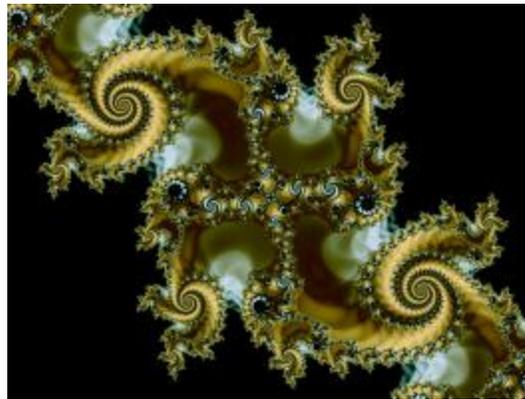


Figura 7.



Figuras 6-8. Conjunto de fractais que apresentam invariância de escala.

aspectos pode não permitir analisá-los separadamente.

Finalmente, gostaríamos de ressaltar um ponto que não tivemos a oportunidade de entrar muito em detalhes, que é o caráter não-linear das equações que descrevem sistemas complexos. Este fato implica que pequenas mudanças nos parâmetros das equações podem ocasionar grandes mudanças nas soluções. Esta característica é freqüentemente observada em ecossistemas e em organizações

sociais, como escolas. Pequenas mudanças no ambiente, por exemplo, provocam grandes mudanças no aproveitamento e produtividade.

Assim, o estudo dos sistemas complexos leva-nos à conclusão de que sim, podemos modelar e tentar explicar sistemas complicados como o clima, ecossistemas e organizações sociais, mas que os resultados não podem ser previstos sem algum grau de incerteza calculável (que pode ser aceitável ou não) e que muito cuidado

deve ser tomado, pois pequenos desvios podem acarretar grandes efeitos, tanto para melhor quanto para o pior. Em todo o caso a exigência de otimização de recursos, humanos e materiais, a que estamos submetidos atualmente, não nos permite tomar decisões relevantes sem uma avaliação da situação tão realista e precisa quanto possível, o que poderia implicar em um modelo ou, na pior das hipóteses, uma metáfora, baseado em equações não-lineares.

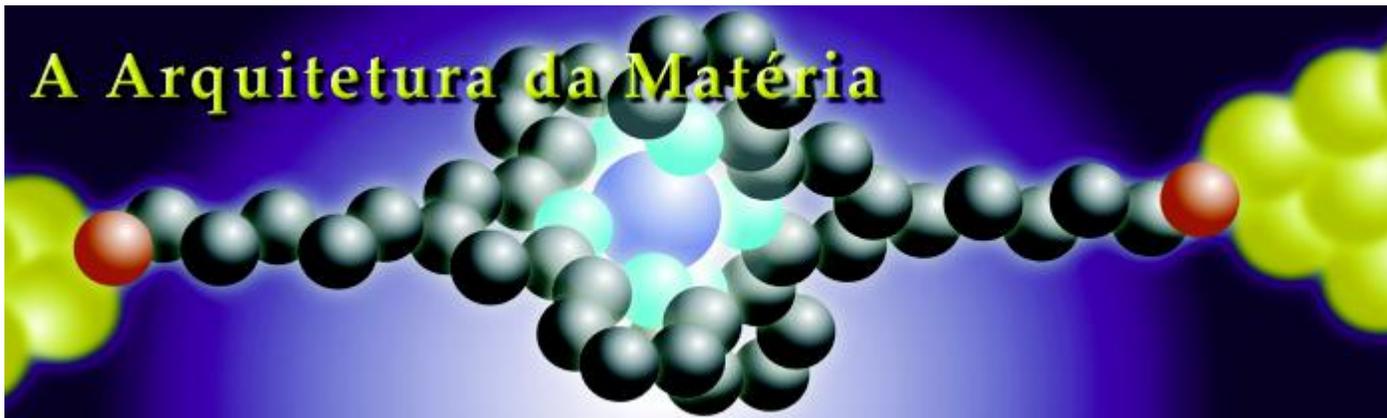
## Referências

Além das referências, listamos outras obras de divulgação científica bastante interessantes e acessíveis ao leigo interessado, bem como alguns sítios na internet.

- [1] D.S. Landes, *A Riqueza e a Pobreza das Nações* (Editora Campus, São Paulo, 1998).
  - [2] C. Sagan, *O Mundo Assombrado pelos Demônios* (Cia das Letras, São Paulo, 1997).
  - [3] B.B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature* (Freeman, São Francisco, 1983).
- P. Bak, *How Nature Works* (Springer-Verlag, New York, 1996).

- F. Capra, *A Teia da Vida* (Editora Cultrix, São Paulo, 1996).
- M. Gleiser, *A Dança do Universo* (Cia das Letras, São Paulo, 1997).
- S.J. Gould, *Wonderful Life* (Penguin, Londres, 1989).
- S. Kauffman, *At Home in the Universe* (Oxford University Press, Oxford, 1995).
- M. Novello, *O Círculo do Tempo* (Editora Campus, Rio de Janeiro, 1997).
- H.-O. Peitgen e P.H. Richter, *The Beauty of Fractals* (Springer Verlag, Berlin, 1986).
- I. Prigogine e I. Stengers, *A Nova Aliança* (Editora UnB, Brasília, 1991).
- C. Sagan, *Cosmos* (Francisco Alves Editora, Rio de Janeiro, 1989).

- <http://scientium.com/drmatrix/> é um endereço de ciência em geral, desde Matemática à Biologia e Geologia. Tem muitos vínculos interessantes também.
- <http://math.rice.edu/~lanius/frac>: é adaptado para escolas dos níveis Fundamental e Médio.
- <http://spanky.triumf.ca/www/fractint/fractint.html>: pode-se baixar versões atualizadas do programa Fractint, que gera fractais.
- [http://www.thorsen.priv.no/services/mandelbrot:java\\_applet](http://www.thorsen.priv.no/services/mandelbrot:java_applet) para o conjunto de Mandelbrot.
- [www.geocities.com/inthechaos/](http://www.geocities.com/inthechaos/) esta página é feita em português.



.....  
**Belita Koiller**

Instituto de Física, Universidade  
Federal do Rio de Janeiro  
e-mail: bk@if.ufrj.br  
.....

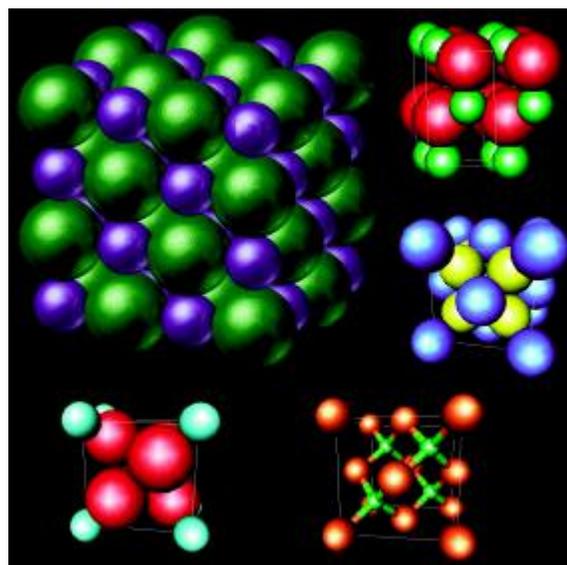
**A** organização dos átomos na formação do estado sólido dos materiais tem conseqüências importantes nas propriedades eletrônicas dos mesmos. O entendimento microscópico da estrutura da matéria é relativamente recente. Há séculos cientistas reconheceram que a matéria não é um contínuo sucessivamente divisível, mas sim constituída de átomos. Uma das evidências deste conhecimento foi a publicação, já em 1822, de um tratado de cristalografia. As formas facetadas dos diferentes cristais, com planos de lapidação preferenciais, permitiu a classificação dos mesmos segundo o posicionamento periódico dos átomos em estruturas geométricas regulares chamadas redes cristalinas.

Em 1869, o cientista russo Mendeleev organizou todas as espécies atômicas até então identificadas em uma tabela com linhas em ordem crescente de massa e na qual elementos em uma mesma coluna têm propriedades químicas semelhantes. Esta organização dos átomos constitui a moderna Tabela Periódica dos Elementos, e sua concepção por Mendeleev deu início à química moderna.

O início da física moderna pode ser atribuído à descoberta, em 1897, da primeira partícula sub-atômica: o elétron. Estudos visando o entendimento microscópico do comportamento dos elétrons em sólidos abriram novas áreas da física básica. Abriam ainda a possibilidade de controle dos elétrons em diferentes materiais, levando a engenhosas invenções e à fabricação dos aparelhos eletrônicos que tanto impactam o nosso dia-a-dia. Neste artigo assinalamos as principais etapas destes desenvolvimentos básicos, bem como algumas aplicações e perspectivas futuras.

da condução de eletricidade pelos metais. Thomson realizou experimentos em um tubo de raios catódicos: raios emitidos por um filamento metálico aquecido semelhante ao de uma lâmpada incandescente, e acelerados por uma grade mantida a um potencial inferior ao do filamento emissor, demonstrando que estes raios eram constituídos de partículas (os elétrons) de carga negativa. Por sua descoberta, Thomson recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1906.

Vários modelos atômicos microscópicos se sucederam imediatamente, dos quais citamos i) o de Rutherford (1911), consistindo um sistema solar em miniatura, com os elétrons orbitando em torno de um núcleo maciço central; ii) o de Bohr (1913), restringindo as órbitas do modelo de Rutherford a alguns poucas segundo critérios de quantização; e iii) o de Schrödinger (1925), abandonando a



Diferentes tipos de arranjos periódicos de átomos formando estruturas cristalinas.

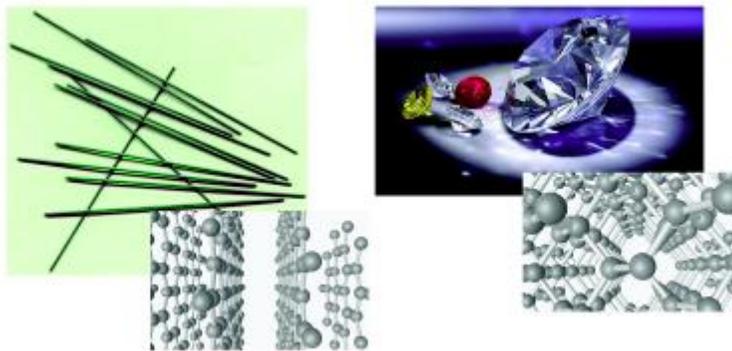
idéia de órbita e adotando a interpretação probabilística da mecânica quântica. Elétrons em átomos, moléculas e sólidos não seguem as leis de Newton da mecânica clássica, mas as leis da mecânica microscópica, ou mecânica quântica. Os trabalhos de Bohr e de Schrödinger, marcos iniciais do sucesso da mecânica quântica, foram também reconhecidos com o Prêmio Nobel em 1922 e 1933, respectivamente.

Evidências experimentais concretas dos arranjos atômicos periódicos no estado sólido foram conseguidas por Davisson e Germer (1927) através de uma técnica de microscopia desenvolvida por eles que utiliza a transmissão de elétrons em vez de luz através do cristal. Este efeito é possível devido ao comportamento ondulatório (quântico) dos elétrons, previsto por de Broglie, o que permite a fabricação dos microscópios eletrônicos, aperfeiçoados e utilizados até hoje. Por seus trabalhos, de Broglie recebeu o Prêmio Nobel em 1929, e Davisson e Germer em 1937. Outro efeito quântico engenhosamente explorado para a fabricação de microscópios poderosos, neste caso permitindo a visualização em escala atômica, é o Efeito Túnel, que consiste na possibilidade de propagação de um elétron através de regiões inacessíveis pelas leis da mecânica clássica. Em 1981, Binnig e Rohrer inventaram o microscópio de varredura por tunelamento (STM), dispositivo que fornece imagens reais da disposição atômica em superfícies de sólidos. Por esta invenção, estes dois pesquisadores receberam o Prêmio Nobel em 1986.

De acordo com o comportamento no transporte de corrente elétrica, os sólidos podem ser classificados em condutores, isolantes ou semicondutores. Com relação à tabela periódica de Mendeleev, os condutores tendem a ocupar a região à esquerda da tabela, e os isolantes à direita, ficando os semicondutores na região de fronteira. Infelizmente, uma tentativa de classi-

**A existência de uma banda parcialmente ocupada garante o comportamento metálico do sólido. Os isolantes e semicondutores correspondem à presença exclusiva de bandas totalmente ocupadas ou desocupadas**

O grafite (à esquerda) é constituído, em escala microscópica, de átomos de carbono ordenados em estrutura hexagonal. Os mesmos átomos de carbono, ordenados em estrutura cúbica, constituem o diamante (à direita).



ficar os sólidos em qualquer tipo de tabela periódica fracassaria, devido à relevância da disposição espacial dos átomos em redes cristalinas. Um exemplo bem conhecido é o caso do carbono no estado sólido: se o arranjo atômico é cúbico, resulta o diamante, enquanto que se o arranjo é hexagonal, resulta o grafite! Em 1955, Bundy e colaboradores realizaram um velho sonho dos alquimistas, submetendo uma amostra de grafite a condições extremas de temperatura e pressão, transformando-a em diamante. Atualmente, várias outras formas do carbono foram identificadas, como por exemplo os nanotubos de carbono.

Um dos sucessos iniciais da mecânica quântica foi a explicação por Bloch, Peierls e Wilson, em 1930, da razão para a diferença notável no transporte de corrente elétrica entre metais e não-metais. As seguintes características do comportamento quântico determinam as propriedades de transporte de elétrons em sólidos cristalinos:

- Os elétrons são partículas caracterizadas pela carga  $e$ , massa  $m$  (como as da partícula clássica) e *spin*. O *spin* é um fenômeno puramente quântico, vagamente semelhante à rotação de um pião. A medida do *spin* do elétron fornece um entre dois valores possíveis:  $\sigma = \uparrow$  ou  $\sigma = \downarrow$  que correspondem, na analogia com o pião, à rotação do mesmo no sentido horário ou

anti-horário.

- A energia dos elétrons tem seus valores restritos a faixas (ou bandas) permitidas intercaladas por faixas proibidas. As faixas proibidas denominam-se *gaps* de energia.

- A cada valor permitido da energia está associado um vetor  $\mathbf{k}$  e um índice de banda  $n$ . O índice de banda indica o ordenamento das diferentes energias associadas a um dado  $\mathbf{k}$ : as energias permitidas são denominadas  $E_n(\mathbf{k})$  e o estado do elétron com esta energia e *spin*  $\sigma$  é denotado por  $|n, \mathbf{k}, \sigma\rangle$ .

- Cada estado  $|n, \mathbf{k}, \sigma\rangle$  pode estar ocupado por, no máximo, um elétron. Esta é a expressão do Princípio da Exclusão de Pauli, outro fenômeno puramente quântico.

Do ponto de vista dos elétrons, o estado fundamental de um sólido, correspondente à situação de mais baixa energia total (temperatura  $T = 0$  K), é obtido ocupando sucessivamente os estados  $|n, \mathbf{k}, \sigma\rangle$  em ordem crescente de energia, até que todos os elétrons do sólido estejam acomodados. Desta forma as bandas de energia mais baixa estarão ocupadas, as de energia mais alta estarão desocupadas. Eventualmente existirão bandas parcialmente ocupadas; a existência de uma banda parcialmente ocupada garante o comportamento metálico do sólido.

Em 1911 foi descoberto um novo estado dos elétrons em condutores quando resfriados a baixíssimas temperaturas: o estado superconductor. Seu descobridor, Kamerling Onnes, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1913. A supercondutividade se estabelece a partir de uma temperatura crí-

tica  $T_c$  que varia de material para material. Por exemplo, no caso do mercúrio,  $T_c = 4$  K, enquanto que  $T_c = 7$  K para o chumbo. O estado supercondutor é caracterizado pela resistência elétrica nula do material para temperaturas abaixo de  $T_c$  e não pode ser descrito no contexto individual de cada elétron: trata-se de um fenômeno coletivo dos elétrons no ambiente da rede cristalina. Outra característica deste estado é a repulsão do supercondutor por um campo magnético aplicado. A supercondutividade continua sendo um dos aspectos mais estudados do comportamento de sólidos, tendo a descoberta dos “supercondutores de alta temperatura” em 1987 ( $T_c$  da ordem de 100 K) revigorado o interesse neste fenômeno.

Os isolantes e semicondutores correspondem à presença exclusiva de bandas totalmente ocupadas ou desocupadas. A separação em energia entre o último estado ocupado e o primeiro desocupado constitui uma faixa proibida, ou *gap*, caracterizada pela energia  $E_{gap}$ . Se o valor deste *gap* de energia for grande comparado às energias térmicas disponíveis, resulta um comportamento isolante, enquanto que se  $E_{gap}$  for da ordem da energia térmica no ambiente do sistema (esta energia é  $E_{term} = k_B T$ ,  $k_B = 1,38 \times 10^{-5}$  eV/K é a constante de Boltzmann e  $T$  a temperatura), obtém-se o comportamento semicon-

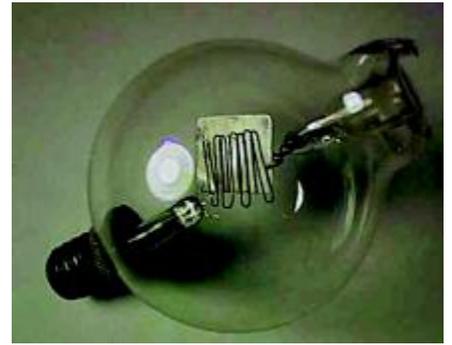


Uma pastilha no estado supercondutor levita acima de uma bobina ao ser repelida pelo campo magnético gerado pela bobina. A supercondutividade é um fenômeno coletivo dos elétrons no ambiente da rede cristalina.

ductor. Na prática, são considerados semicondutores materiais com  $E_{gap}$  até 2 eV.

Em 1906, De Forest inventou um dispositivo denominado válvula triodo, que é semelhante ao tubo de raios catódicos de Thomson: elétrons emitidos por um filamento são acelerados ou freados pelo potencial de uma grade de controle. Neste caso os elétrons que atravessam a grade são recolhidos por um dreno, fechando um circuito elétrico. A ação deste dispositivo é de *controlar* uma resposta relativamente forte – a corrente colhida pelo dreno – através de um sinal relativamente fraco – a tensão aplicada à grade. A válvula constitui portanto um **amplificador** de sinal elétrico, tendo sido utilizada em vários aparelhos elétricos como os amplificadores de som e as primeiras televisões. O primeiro computador eletrônico digital, denominado ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), também utilizava válvulas. As válvulas apresentam limitações severas: os feixes de elétrons transitam em tubos de vidro que são volumosos e frágeis, além das altas temperaturas requeridas para que os filamentos metálicos emitam os elétrons, gerando forte aquecimento e dissipação de energia. Outro grave inconveniente é sua curta vida útil, comparável à de uma lâmpada incandescente. O enorme sucesso e a rápida proliferação de aplicações desta invenção demandou portanto a substituição das válvulas por dispositivos de estado sólido: o *habitat* robusto e natural para os elétrons.

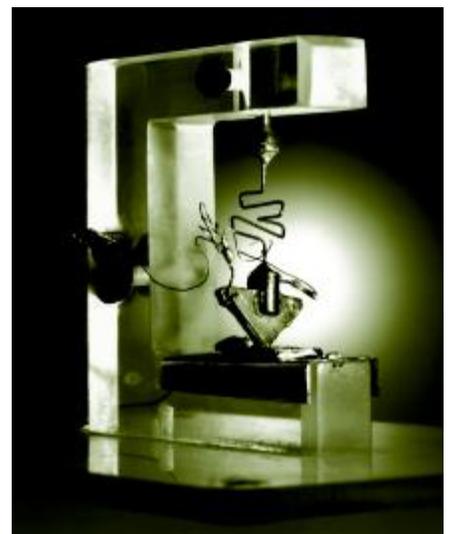
O substituto da válvula triodo de De Forest foi desenvolvido pelos pesquisadores Shockley, Bardeen e Brattain nos laboratórios da Bell Telephone em 1947. Eles receberam o Prêmio Nobel de Física em 1956 pela invenção do *transistor*. Trata-se de um dispositivo semiconductor, que se baseia no fato de que a substituição de uma pequena fração dos átomos de um material semiconductor, como o silício, por outra espécie atômica, como o fósforo, aumenta significativamente sua condutividade elétrica. A substituição de átomos de um semiconductor por outros, visando alterar



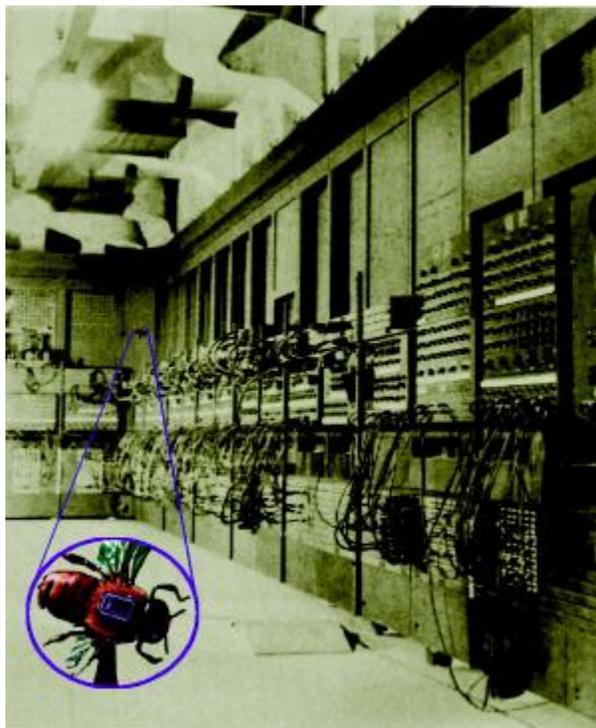
A válvula apresenta limitações severas: é volumosa, frágil, dissipa energia gerando calor e tem vida útil relativamente curta.

suas propriedades de transporte elétrico, é denominada *dopagem*. Através de diferentes dopantes, é possível produzir semicondutores onde o transporte de corrente é realizado por portadores de carga negativa ou positiva, e cuja densidade também pode variar de acordo com a concentração dos mesmos. Nas aplicações em dispositivos semicondutores, a dopagem envolve tipicamente a substituição aleatória de um para cada milhão de átomos no semiconductor.

O controle de sinais elétricos por transistores permite sua aplicação tanto em circuitos amplificadores quanto em circuitos lógicos. No caso de operações lógicas, o transistor funciona como uma chave, que abre e fecha um circuito elétrico fornecendo os bits 0 ou 1 conforme os sinais recebidos. Os *chips* dos computadores modernos são circuitos integrados (CI),



O primeiro transistor, protótipo montado em 1947 por Shockley, Bardeen e Brattain.



Sessenta anos da nossa aventura tecnológica: do Eniac (1946), com 17.468 válvulas, 500.000 conexões de solda, 30 toneladas de peso abrigadas em 180 m<sup>2</sup> de área construída, com 5,5 m de altura, 25 m de comprimento aos modernos chips com 42 milhões de transistores.

isto é, fabricados em um único “bloco” de silício e contendo dezenas de milhões de transistores. O primeiro CI foi fabricado por J. Kilby em 1958, tendo viabilizado a produção de calculadoras de bolso a partir de 1966. Pela invenção do CI, Kilby recebeu o Prêmio Nobel de Física no ano 2000. Atualmente a operação de cada transistor como uma chave lógica envolve uma corrente elétrica produzida por cerca de 1000 elétrons. Já foi demonstrado que é possível fabricar um transistor (SET) cujo chaveamento envolve a passagem de um único elétron.

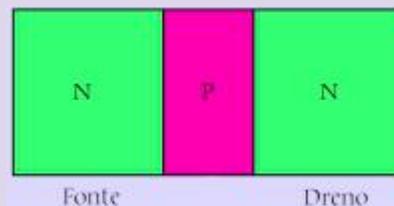
O vigoroso crescimento da microeletrônica é muitas vezes quantificado pela “lei” de Moore, que estabelece que o número de componentes em um único *chip* duplica a cada 18 meses. Embora esta tendência, enunciada em 1965, continue verdadeira no início do século XXI, fatalmente ela se esgotará quando o tamanho de componentes individuais nos *chips* se aproximar das dimensões atômicas: este será o fim da linha para dispositivos de Si baseados em sucessivos aprimoramentos e ajustes das concepções atuais. Os processos eletrônicos

envolvidos nos componentes semicondutores em uso exploram as propriedades quânticas dos elétrons, porém os sinais aplicados e medidos – tensões e correntes – são clássicos, semelhantes aos análogos nas válvulas que os precederam. Para *bits* constituídos de um único átomo, os efeitos quânticos se manifestam em todas as etapas do processamento. A manipulação controlada de estados de vários *bits* quânticos, ou *qbits*, é alvo de intensas pesquisas atualmente em desenvolvimento, inclusive no Brasil. Espera-se que uma nova geração de componentes eletrônicos opere em regime inteiramente quântico, levando ao desenvolvimento de transistores e outros dispositivos

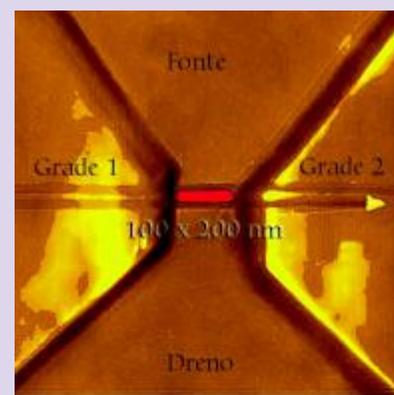
mais complexos tais como computadores quânticos.

A computação quântica pode revolucionar a solução de alguns tipos de problemas numéricos. Propostas de computadores quânticos baseados em semicondutores vêm despertando grande interesse devido à possibilidade de utilização dos recursos disponíveis associados com a infra-estrutura tecnológica já existente, bem como pela possibilidade de integração com os dispositivos convencionais. Tentativas de nano-fabricação de tais dispositivos baseados em silício e arseneto de gálio encontram-se em andamento, porém a possibilidade de controle das diversas operações necessárias ao funcionamento destes e de outros tipos de computadores quânticos permanece um desafio em aberto. Segundo Bruce Kane, que formulou em 1998 uma proposta de computador quântico baseado em silício, as flutuações inerentes a semicondutores dopados limita o desempenho da computação quântica, que poderá só ser acessível no limite extremo da lei de Moore: quando a engenharia de fabricação de

### Rumo ao futuro: o transistor de um elétron



Um transistor consiste na justaposição de camadas de semicondutores com diferentes tipos de dopagem. A operação de cada transistor como uma chave lógica envolve a passagem de cerca de mil elétrons entre a fonte e o dreno.

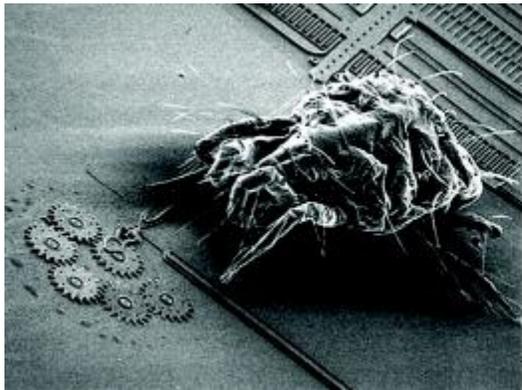


Protótipo de um SET (single electron transistor) fabricado por H.W. Schumacher em 1999. O chaveamento do SET envolve a passagem de um único elétron.

dispositivos atingir o nível de controle individual: átomo-por-átomo. Concluimos este trabalho lembrando sábias palavras a respeito dos átomos:

*Se, em algum cataclisma, todo o conhecimento científico fosse destruído, e uma única frase passasse para a próxima geração de criaturas, que frase conteria mais informação no menor número de palavras? Acredito que seja a hipótese atômica, o fato de que todas as coisas são feitas de átomos – pequenas partículas em movimento perpétuo, que se atraem quando estão próximas, mas que se repelem quando pressionadas entre si. Nesta frase existe uma enorme quantidade de informação sobre o mundo, se um pouco de imaginação e pensamento forem aplicados.*

R.P. Feynman  
The Feynman Lectures  
on Physics



# O Que é Nanociência e Para Que Serve a Nanotecnologia?

.....  
**Peter A.B. Schulz**

Instituto de Física, UNICAMP  
e-mail: pschulz@ifi.unicamp.br

.....

## A bilionésima parte

O prefixo nano, seguido de alguma outra palavra, aparece com frequência cada vez maior no nosso dia-a-dia. Por enquanto essa presença dá-se principalmente através dos meios de comunicação (no instante em que estou revisando esse artigo, em janeiro de 2005, o termo “nanotecnologia” aparece 33.400 vezes no *Google*, apenas em páginas brasileiras). Muitas das notícias parecem prometer que essa presença será mais efetiva em algum futuro mais ou menos distante, embora aplicações de “nano-isso” ou “nano-aquilo” já estejam disponíveis e melhorando a nossa qualidade de vida. O Ano Internacional da Física em 2005 representa um ótimo pretexto para olhar com bastante atenção para essa verdadeira “nano-mania”. Acho que vale a pena até compará-la a uma também verdadeira “micro-mania”, que existia há exatamente um século, ou seja, por volta do “ano miraculoso” da Física.

O prefixo nano descreve uma ordem de grandeza, vem do grego e quer dizer essencialmente um bilionésimo de alguma coisa. No caso atual estamos interessados em um bilionésimo de metro, o nanômetro. Nanociência e nanotecnologia são, portanto, ciência e tecnologia que acontecem ou são feitas nessa escala de comprimento, mas de maneira controlável e reprodutível, envolvendo fenômenos que muitas vezes não

ocorrem em outras escalas de tamanho. Em outras palavras, não estamos falando simplesmente de miniaturização de algo grande para algo muito pequeno. O tema, embora recente, não pode ser esgotado em um espaço tão pequeno (sem trocadilho) como o desse artigo. Na medida do possível, referências a outros artigos impressos e, principalmente, artigos na internet, tentam complementar a história contada aqui [1-2].

## O relógio como exemplo

Um exemplo fantástico de miniaturização é dado pelos antigos relógios mecânicos, aqueles que precisavam de corda, lembram-se? Os primeiros relógios com engrenagens e pêndulos ficavam no alto das torres das igrejas medievais e as peças tinham que ser medidas em metros. Alguns séculos se passaram e essas peças foram miniaturizadas e os relógios

**Nos primeiros relógios mecânicos as engrenagens e pêndulos eram medidos em metros. Em alguns séculos as peças foram miniaturizadas e passaram a ter dimensões de milímetros, mas o princípio físico para medir o tempo continuou o mesmo**

passaram a ser usados nos pulsos das pessoas e as peças passaram a ter dimensões de milímetros. É uma história fascinante, pois estamos falando de uma diminuição de tamanho

de mil vezes! No entanto, o antigo e enorme relógio da torre da igreja é essencialmente o mesmo dispositivo de engrenagens e alavancas do relógio de pulso (à corda, com rubis, etc.). O princípio físico para medir o tempo continuou o mesmo. Nos relógios a quartzo temos uma mudança fundamental no princípio para medir o tempo, que leva a um dispositivo

A partir da miniaturização, outros vários aspectos da nanociência e nanotecnologia são discutidos. Apesar de característica desse começo de século, a história da nanociência comemora também, de certa forma, seu centenário em 2005.

muito menor e mais preciso. Estamos falando de um cristal de quartzo de dimensões de milésimos de milímetro de comprimento. Diminuímos o dispositivo novamente em mil vezes, mas o relógio de pulso é para que as pessoas possam ver as horas, portanto um dispositivo tão pequeno tem que ser acoplado a ponteiros e mostradores grandes o suficiente para serem vistos, resultando em algo do mesmo tamanho dos antigos relógios de pulso, que precisavam de corda. Então qual foi a vantagem, além de saber as horas com uma precisão maior do que a necessária? Simplesmente eles são muito mais leves e baratos e o relógio deixou de ser um objeto exclusivo para virar brinde na compra de sandálias. Mas isso já é nanociência, ou melhor, nanotecnologia? Ainda não! Temos que pensar em diminuir as dimensões em outras mil vezes, além de outras

coisas, mas as potenciais consequências sobre a sociedade, envolvendo o controle de novos fenômenos físicos, nessa viagem ao muito pequeno é bem ilustrado por essa breve e leiga digressão sobre o relógio [3]. Por outro lado, para ser sincero, essa história do relógio atravessou só umas 3 ou 4 ordens de magnitude. O conhecimento humano consegue vislumbrar até 39 ordens de grandeza, como ilustrado no tema "Potências de 10" [4].

### Sobre a necessidade de novas tecnologias

O exemplo da sofisticação do relógio é também um motivador para uma pergunta importante: para que novos paradigmas tecnológicos? No caso do relógio, a possibilidade de uma medição precisa do tempo tornou possível a navegação (medição de longitude) e mais recentemente relógios atômicos são necessários nos satélites de navegação por GPS [5]. Vamos pensar em um outro paradigma tecnológico, no caso algo mais próximo ao

nosso tema, ou seja, a eletrônica! Como era a nossa vida no início do século XX? Bem, a invenção do diodo de válvula ocorreu em 1904 – por isso 2005 pode ser quase considerado o ano internacional da eletrônica também! No alvorecer do século passado podíamos ler à noite com iluminação elétrica. Era possível ir ao cinema, telefonar ou ouvir música em casa com a ajuda dos gramofones. A eletrônica certamente aperfeiçoou todos esses aspectos do nosso cotidiano, mas não foi necessária para a criação de todos esses inventos. Herbert Kroemer, prêmio Nobel de Física de 2000, pela invenção do laser de semicondutores

**A invenção do diodo de válvula ocorreu em 1904 - por isso 2005 pode ser quase considerado o ano internacional da eletrônica também! Depois dele a invenção do transistor, em 1947, e a do circuito integrado, em 1959, propiciaram outros passos para a miniaturização de componentes eletrônicos**

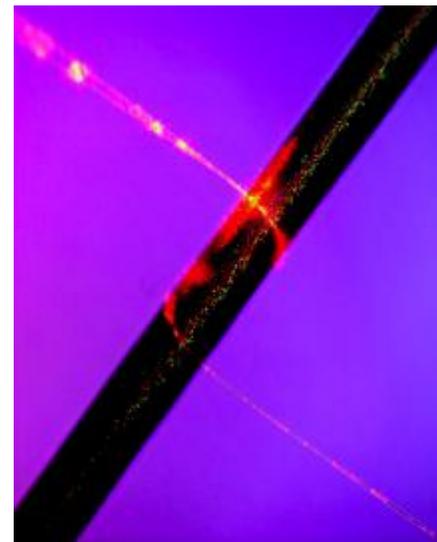
[6], salientou em recente palestra que uma tecnologia não é criada para simplesmente "fazer melhor o que é feito com as tecnologias já existentes". E o que as tecnologias anteriores à eletrônica não foram capazes de criar? A resposta é a comunicação sem fio, o

rádio. A transmissão e recepção de dados complexos (som e depois imagem) a longas distâncias.

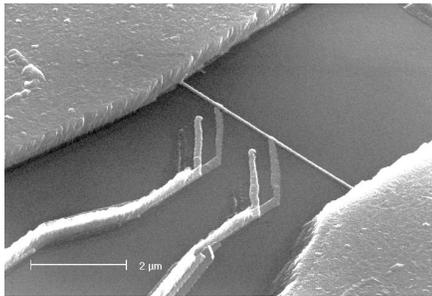
### A origem da nanociência e seu profeta

Não demorou muito e a eletrônica seguiu o exemplo dos relógios, ou seja, a busca da miniaturização. Dois foram os passos fundamentais para tornar essa miniaturização efetiva: a invenção do transistor em 1947 [7] e a do circuito integrado em 1959. Eram novas tecnologias, baseadas em materiais semicondutores e não mais em bulbos de vidro com filamentos. Com isso foi possível chegar à microeletrônica, também um novo, digamos, paradigma tecnológico, como o foi a eletrônica 50 anos antes. Novamente devemos nos lembrar que a microeletrônica não se desenvolveu para fazer melhor o que a "macroeletrônica" já fazia e sim para dar origem a algo novo: o processamento em grande volume e velocidade de dados e a possibilidade de transmiti-los em quanti-

dade e velocidade inimagináveis para os antigos "racks" de válvulas. Mas ainda estamos no micrômetro e não no nanômetro e, portanto, vale a pena voltar ao ano de 1959 e falar de uma profética palestra de Richard Feynman: "Está cheio de espaço lá embaixo" (*There is plenty of room at the bottom*), proferida em um encontro da *American Physical Society* em 29 de dezembro de 1959 [7]. Nessa palestra ele abordou a miniaturização de registros de memória como letras impressas (mas hoje em dia podemos falar diretamente de bits e suas dimensões). Um bit (0 ou 1) é a unidade de informação binária e um caracter do nosso sistema de linguagem precisa de uns oito bits para ser representado, mas vamos arredondar para dez, pois só falaremos de estimativas. Até o ponto anterior a essa frase, esse texto soma aproximadamente 5.700 caracteres. Quanto espaço pode ocupar essa quantidade de informação? A palestra de Feynman pode ser vista como uma "resposta especulativa" a essa pergunta. Hoje em dia um bit gravado em um CD tem uma dimensão típica de 0,5 microm. Portanto os cerca de 6000 caracteres são traduzidos em 60.000 bits que ocupariam uma tri-



Luz de nanofios: um nanofio de sílica transporta um feixe de luz em volta de um cabelo humano. Os nanofios são flexíveis e podem ter apenas 50 nanômetros de diâmetro, cerca de um milésimo da espessura de um fio de cabelo ([http://www.fas.harvard.edu/home/news\\_and\\_events/releases/nanowire\\_12172003.html](http://www.fas.harvard.edu/home/news_and_events/releases/nanowire_12172003.html))



Um nanofio de prata de 50 nm de altura, 100 nm de largura e 1 microm de comprimento está conectado a dois reservatórios supercondutores constituídos de filmes de alumínio de 400 nm de espessura. A densidade de estados eletrônicos no fio é medida pelos dois dedos de prata conectados no meio do caminho. Esse dispositivo foi fabricado por meio de nanolitografia de feixe eletrônico e evaporação do material através de máscaras (vide texto) (<http://www-drecam.cea.fr/drecam/spec/Pres/Quantro/Qsite/gallery/nanowire.htm>).

Iha de 30.000 micra, ou seja, 3 enormes centímetros, de comprimento e 0,5 microm de largura, que corresponde a uma área menor que o pingo desse i. Parece impressionante, mas ainda pouco ousado para Feynman.

Afinal o que representa 0,5 microm? Já sabemos que é a aresta de um “cubo” gravado em um CD que representa um bit. Quantos átomos cabem nesse cubo? São cerca de  $10^{10}$  (dez bilhões). Supondo que só fossem necessários 10 átomos para registrar um bit, o pingo

daquele i poderia armazenar  $6 \times 10^{12}$  caracteres, um bilhão de vezes mais do que na estimativa anterior. Imagine que até agora esse texto chegou a cerca de 6.500 caracteres: No pingo do i seríamos capazes de guardar a informação contida em um texto 1 bilhão de vezes maior que esse! Feynman lançou então esse desafio e previu que no ano 2000 as pessoas se perguntariam porque apenas em 1960 a humanidade começou a pensar nessa possibilidade. Feynman é uma espécie de profeta, pois esse

**Uma caixinha de 0,1 microm de aresta pode ser carregada por 1000 elétrons, para a densidade dada. Diminuindo a aresta para 0,01 microm a caixinha seria carregada com um único elétron! Não é possível diminuirmos mais do que isso, e já estamos chegando perto desse limite nos “transistores de elétron único”**

desafio passou a ser levado a sério nos últimos 20 anos e é parte importante do que chamamos de nanociência. O porque de que só em 1960 começou-se a pensar em mover nessa direção tem uma resposta razoavelmente simples: foi nessa época que foram inventados os circuitos integrados e dispositivos opto-eletrônicos que permitiram os primeiros passos nesse caminho.

### O caminho de cima para baixo (*top-down*)

O problema é como trabalhar nessas dimensões. Uma maneira já tradicional, chamada de abordagem “de cima para baixo” (*top-down*), consiste em “esculpir” circuitos cada vez menores nos *chips* de silício, por exemplo. Uma maneira é por ataque químico. Receita simples (os detalhes de protocolo e a “cozinha” são extremamente sofisticados): cubra o tablete *wafer* de silício com um material foto sensível que se modifica quimicamente quando exposto à luz e cubra esse material com uma máscara com o esquema do microcircuito que deve

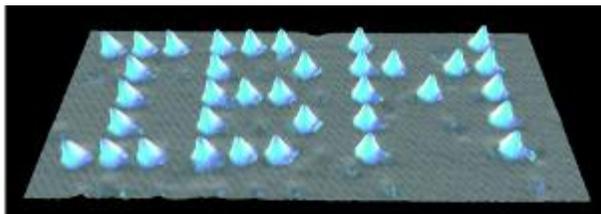
ser formado no chip. Depois ilumine o conjunto, retire a máscara e “revele” com um ácido (especial), que elimina apenas o material foto sensível não iluminado junto com o material semicondutor embaixo. Pronto: criaram-se canais e ligações no silício, que deverão ser pre-

enchidos com outros materiais. Esse processo é repetido várias vezes e o “bolo” acaba tendo muitas camadas. Uma idéia da complexidade do processo de fabricação de um componente desses é bem descrita por simulações disponíveis livremente na internet [9]. Onde está o nano nessa história? Está no tamanho dos detalhes do desenho na máscara. Uma maneira é desenhar o circuito em escala gigante em uma tela de 3,5 x 2,5 m. Essa tela é enquadrada por uma máquina fotográfica e fotografada com um filme

de alta resolução. O desenho todo é transferido para um fotograma de 35 mm x 25 mm, que será a máscara. Um traço de um milímetro de espessura na tela é diminuído de uma escala de 100 vezes, ou seja, no fotograma ele terá apenas 10 microns. Bem, já deu para chegar na microeletrônica, mas ainda não é suficiente. Como fazer desenhos menores? Atualmente são utilizados feixes de elétrons, que podem ser focalizados em pontos de até 0,05 microm. Essa “caneta” pode ser guiada com grande precisão e gravar o circuito diretamente sobre o material foto sensível mencionado acima. Agora a dimensão característica de 10 microns foi reduzida 200 vezes e chegamos à escala de 50 nanômetros. Na verdade, hoje em dia é utilizada a chamada tecnologia de 0,07 microm (dimensão característica de detalhes do circuito integrado) na fabricação de microprocessadores. Pode-se dizer que de certa forma a atual eletrônica já está mais para “nano” do que para “micro”.

Vamos especular sobre um dos desafios dessa nanoeletrônica. O silício para fins eletrônicos tem cerca de  $10^{18}$  elétrons por centímetro cúbico. Do ponto de vista físico, um bit é uma “caixinha” de silício vazia, representando o 0, ou carregada de elétrons, representando o 1. Uma caixinha de 0,1 microm de aresta seria carregada por 1000 elétrons, para a densidade dada. Se diminuirmos a aresta para 0,01 microm a caixinha seria carregada com um único elétron! Não é possível diminuirmos mais do que isso, e já estamos chegando perto desse limite. Aliás, os “transistores de elétron único” (*single electron transistor*) já existem como protótipos experimentais e são utilizados como sensores [10].

Apesar de tudo isso ser fantástico, devemos ter em mente a profecia de Feynman: quantos átomos de silício existem nesse cubo de 0,01 microm de lado? Cerca de 60.000, e se pudéssemos realizar a profecia (registrar um bit em apenas 10 átomos) ainda poderíamos avançar entre 3 e 4 ordens de grandeza! Isso, no entanto, é impossível de cima para baixo. Temos que ir de baixo para cima.



Artistas quase sempre precisaram de mecenas (cientistas também!). Aqui o artista, logo após a descoberta de como mover átomos com um microscópio de tunelamento, encontrou uma maneira de retribuir à corporação que lhe deu emprego, quando precisou, e os meios necessários para que fosse bem sucedido (<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/atomo.html#stm10>).

### A vereda de baixo para cima (bottom-up)

Registrar e ler bits em escala de poucos átomos não é possível, como vimos, na eletrônica “tradicional”. Uma nova tecnologia torna-se necessária. Essa tecnologia, chamada de microscopia de sonda por varredura (*scanning probe microscopy*) passou a ser desenvolvida nos anos 80 do século passado com a invenção do microscópio de tunelamento (prêmio Nobel de 1986) e o posterior desenvolvimento do microscópio de força atômica [11]. Uma ponta extremamente fina, constituída de poucos átomos, pode ser aproximada, afas-

**Sabemos há um bom tempo que todas as coisas são feitas de átomos e agora estamos aprendendo a fazer as coisas a partir dos átomos**

tada e varrida ao longo de uma superfície com precisão de até 0,1 Angstron. É uma das maneiras para se “ver” átomos individualmente [12], mas o que nos interessa principalmente é que essa ponta, sob certas tensões elétricas, é capaz de arrancar um único átomo e depois depositá-lo em outro ponto da superfície. É, portanto, uma ferramenta para manipular átomo a átomo, como um pedreiro consegue fazer com tijolos. *Sabemos há um bom tempo que todas as coisas são feitas de átomos e agora estamos aprendendo a fazer as coisas a partir dos átomos* [13]. Esse talvez seja o conceito essencial da nanociência. Existem vários protótipos de nano objetos construídos átomo a átomo e podemos formar toda uma galeria de imagens com eles [14].

Problemas? Pelo menos um bem grande: um microprocessador “tradi-

cional” tem milhões de componentes, que são construídos simultaneamente. Construir um objeto com essa complexidade, movendo uma peça (no caso um átomo) de cada vez torna o processo extremamente lento. Essa tecnologia parece, por enquanto, limitada a situações nas quais alguns protótipos são necessários, não sendo

factível para uma “produção em série”. A aposta para uma “produção em série” aparece no conceito de auto-organização.

### Átomos que se auto-organizam

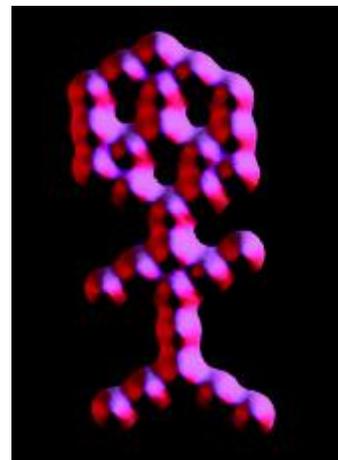
Se nos convencemos de que a nanociência teve um profeta, é justo que possamos falar também de um guru da nanotecnologia. Esse papel pode ser atribuído a K.E. Drexler, autor do livro *Engenhos da Criação: O advento da Era da Nanotecnologia* de 1990 [15]. A idéia, audaciosa sem dúvida, baseia-se na possibilidade de que os próprios “nano objetos” se organizassem e construíssem os dispositivos para os quais as máquinas exteriores (como os

microscópios) tornaram-se incapazes. A natureza fornece pelo menos dois exemplos muito úteis: os átomos organizam-se em arranjos periódicos (cristais) quase que por si só, desde que algumas condições sejam satisfeitas (não é necessário enfileirá-los um a um via agente externo), como no caso do átomo de carbono. A propósito, duas formas de organização dos átomos de carbono foram descobertas nas últimas décadas: o fulereno e o nanotubo de carbono. São grandes estrelas da nanociência e mereceriam um capítulo à parte. Esse lapso certamente é sanado pelas notas de aula do Prof. Rodrigo Capaz da UFRJ [16]. Um outro exemplo de auto-organização e auto-montagem é o DNA, cujas características estão sendo exploradas como opção para uma eletrônica molecular [17] (lembrem-

se: uns poucos átomos para representar um bit [18]).

### Uma outra origem: Einstein, os colóides e as nanopartículas

Partículas suspensas em líquidos são consideradas coloidais se seu tamanho varia de alguns nanômetros até centenas de microns. O limite inferior aproxima-se de dimensões moleculares. O limite superior indica uma situação na qual as forças externas (como a atração gravitacional) passam a determinar a dinâmica no lugar do movimento Browniano, descrito por Einstein em um dos artigos do ano miraculoso [19]. Essa história é fascinante e constitui um dos marcos históricos da nanociência. Uma questão fundamental no início do século XX era a determinação da carga do elétron, bem como a determinação precisa do número de Avogadro. Os dois problemas eram correlacionados: tanto a matéria quanto a carga elétrica têm unidades fundamentais, átomos e elétrons, respectivamente. Esse aspecto não-contínuo da natureza ainda sofria forte oposição de cientistas importantes da época: “fazer dos átomos objeto de pesquisa, fosse na Física ou na Química, era considerado pelos adeptos de Ernst Mach (1838-1916) como uma hipótese metafísica falsa e até mesmo perigosa” [19]. Essa corrente de uma física fenomenológica praticamente caiu por terra com a determinação da carga do elétron por Millikan (1868-1953) [19] e a medida do número de Avogadro por J. Perrin (1870-1942) [20], sem falar na descrição do movimento Browniano



Outro exemplo de arte com átomos (<http://www.almaden.ibm.com>)

por Einstein. Estamos falando, portanto, de duas experiências fundamentais e que tinham em comum a necessidade de partículas muito pequenas e homogêneas. Vale lembrar que as gotículas de óleo na experiência de Millikan tinham um raio médio de 2,8 micra (2800 nm), enquanto as pequenas esferas da experiência de Perrin, apenas 0,2 microm (200 nm!). Esses estudos fundamentais tornavam mais acessível o mundo do colóides, que tinha também um guru, o químico Wolfgang Ostwald (1883-1943), que escreveu um livro chamado *O Mundo das Dimensões Esquecidas* (1914, mas publicado apenas depois da 1ª Guerra Mundial). Acreditava-se que a ciência dos colóides teria grandes aplicações com promessas para a indústria e para a Medicina.

É interessante nesse Ano Internacional da Física comparar a ciência dos colóides com a nanociência, que ganharam destaques nos extremos opostos do século XX. Vale lembrar uma vez mais que partículas coloidais são nanopartículas, cujo negócio é estimado em mais de US\$ 40 bilhões anuais. E as promessas de aplicações em Medicina estão se realizando com a utilização de nanopartículas magnéticas no diagnóstico e tratamento do câncer [22], entrega inteligente de remédios no interior do corpo humano [23] e até mesmo cremes contra



Os cálices de Licurgo, exemplo de “nanoartesanato” do século IV D.C. (<http://lilt.ilstu.edu> e <http://www.cambridge2000.com>).

rugas [24].

### Algumas aplicações são mais antigas ainda

O produto mais antigo da nanotecnologia conhecido é o cálice de Licurgo, que remonta ao século IV D.C. e se encontra no museu britânico. Esse cálice romano é feito de um vidro que parece verde sob luz refletida, mas é vermelho translúcido sob luz transmitida através dele. Esse efeito óptico é causado por nanopartículas compostas de ouro e prata de apenas 70 nm

de diâmetro [25]! Isso foi provavelmente obtido por acidente, de modo que é um exemplo de “nano artesanato” e não de tecnologia, que se baseia em protocolos que podem ser reproduzidos. Nada impede que o leitor se aventure um pouco com a nanociência usando poucos recursos [26], ou mesmo muito poucos recursos: basta um lápis e uma folha de papel. Você sabe a espessura de um traço de lápis sobre o papel? Uma estimativa [27] por medida de resistência elétrica leva ao incrível valor de... 17 nm(!)

## Referências e Notas

- [1] <http://www.thenanotechnologygroup.org/id46.htm>.
- [2] <http://www.comciencia.br/reportagens/framereport.htm>.
- [3] <http://www.numaboa.com.br/relogios/timeline.php>.
- [4] <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/powersof10/index.html>.
- [5] <http://gps.ciagri.usp.br/>.
- [6] <http://www.sobiografias.hpg.ig.com.br/HerbKroe.html>.
- [7] Adenilson J. Chiquito e Francesco Lanciotti Jr., O transistor, 50 anos. RBEF **20**, 309 (1998).
- [8] <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>.
- [9] <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transistor/index.html>.
- [10] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110030603>.

- [11] [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69131998000600002&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69131998000600002&script=sci_arttext).
- [12] Caio Mário Castro de Castilho, Quando e como o Homem começou a “ver” os átomos! RBEF **25**, 364 (2003).
- [13] Essa frase eu ouvi do Prof. Cylon Gonçalves da Silva, professor emérito do Instituto de Física da UNICAMP.
- [14] <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/stm.html>
- [15] <http://www.foresight.org/FI/Drexler.html>.
- [16] <http://omnis.ufuf.br/~capaz/ffnc/notas.html>.
- [17] N.C. Seeman, Nanotecnologia e a dupla hélice. Scientific American Brasil **26**, 27 (2004).
- [18] <http://seemanlab4.chem.nyu.edu/homepage.html>.
- [19] A. Einstein, Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Ann. Phys.* **17**, 549 (1905).

- [20] G. Holton, in *Subelétrons, Pressupostos e a Polêmica Millikan-Ehrenhaft*, editado por Zahar editores *A Imaginação Científica*.
- [21] A. Bebechibuli, L.H. Libardi e V.S. Bagnato, Determinando o número de Avogadro pelo método de J. Perrin. RBEF **21**, 447 (1999).
- [22] M. Knobel e G.F. Goya, Ferramentas magnéticas na escala do átomo. Scientific American Brasil, **31**, 58 (2004).
- [23] U. Capozzoli, O Brasil na era da nanotecnologia. Scientific American Brasil **1**, 38 (2002).
- [24] Revista Veja, p. 72, edição 1889, 26/01/2005.
- [25] (<http://www.begbroke.ox.ac.uk/nano/accessWeb/history.html>).
- [26] V. Rodrigues e D.M. Ugarte, Quantização da condutância: Um experimento simples para o ensino de Física. RBEF **21**, 264 (1999).
- [27] [http://www.pencilpages.com/articles/veja\\_o\\_Alice\\_Newcomber's\\_physics\\_project](http://www.pencilpages.com/articles/veja_o_Alice_Newcomber's_physics_project).

# A Hipermídia e a Aprendizagem de Ciências:



## Exemplos na Área de Física

### Introdução

**U**ma das linhas de pesquisa de alta relevância no campo das Tecnologias da Informação e Comunicação aplicadas ao ensino de Ciências é a que propõe o desenvolvimento de sistemas hipermídia e o estudo de processos de aprendizagem a partir de sua utilização. Um projeto de pesquisa<sup>2</sup> tendo como parte de seus objetivos o desenvolvimento e a pesquisa sobre materiais didáticos desta natureza, se propôs a produzir materiais didáticos dirigidos às necessidades de professores e alunos de Física e de disciplinas relacionadas à Física, como é o caso da Biomecânica, que se apóia em conceitos da mecânica para compreender as atividades físicas. Este esforço é válido para o ensino no nível médio e para cursos de licenciatura em Educação Física, que se ressentem da escassez de materiais didáticos que possam contribuir para melhorar o nível motivacional e cognitivo dos alunos.

No âmbito do projeto mencionado, foram produzidos três sistemas hipermídia que contemplam conteúdos de física e suas relações interdisciplinares com outras áreas. Um dos sistemas, denominado de Força & Movimento [1], explora conceitos de mecânica básica, outro, denominado de Biomec [2], integra conteúdos de mecânica, biomecânica e anatomia humana e o terceiro, Energia [3], aborda diferentes aspectos relativos a este

**Uma das linhas de pesquisa de alta relevância no campo das Tecnologias da Informação e Comunicação é a que propõe o desenvolvimento de sistemas hipermídia e o estudo de processos de aprendizagem a partir de sua utilização**

tema. Estudos sobre a utilização do F&M e do Biomec no contexto educacional a partir de dados coletados por testes (lápiz e papel) e registros da navegação possibilitaram identificar estratégias e formas diferenciadas de interação dos usuários com a informação disponibilizada no formato hipermídia.

O presente trabalho apresenta uma descrição sucinta dos programas desenvolvidos e de alguns resultados dos estudos realizados, oferecendo assim, um panorama geral sobre o potencial educacional dos sistemas hipermídia para o ensino-aprendizagem de ciências.

### Sistemas hipermídia de aprendizagem

Sistemas hipermídia podem ser conceituados a partir da relação entre os conceitos de hipertexto e multimídia: a *multimídia* compreende os

múltiplos meios que podem ser usados na representação de uma informação, como, por exemplo, texto, imagem, áudio, animação e vídeo. Este termo pode se referir a um sistema computacional ou a outros

suportes não informatizados. Por *hipertexto*, entende-se um sistema computacional que apresenta informação em geral na forma de texto, organizada não-sequencialmente, por meio de ligações entre *palavras-chave* (*vínculos*), destacadas em geral pela cor, que permitem a *navegação*<sup>3</sup> do usuário entre *nós*<sup>4</sup> relacionados con-

.....  
**Flavia Rezende**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
e-mail: frezende@nutes.ufrj.br

.....  
**Susana de Souza Barros**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
e-mail: susana@if.ufrj.br

.....

---

A hipermídia é uma ferramenta muito poderosa e deve ser usada no ensino. Discutimos aqui alguns sistemas desenvolvidos e como é a interação dos estudantes com tais sistemas.

ceitualmente. Assim posto, o conceito de *hipermídia* pode ser visto como a interseção entre os conceitos de multimídia e hipertexto (Figura 1), na medida em que se trata de sistemas computacionais que permitem a ligação interativa não seqüencial entre nós de informação, como os sistemas de hipertexto, mas representados por múltiplos meios.

Por suas características, os sistemas hipermídia descartam o processo de leitura seqüencial nos moldes tradicionais e permitem que um conceito seja apresentado através de diversos meios, associados àqueles que o texto confere. Nessa organização diferenciada da informação, os sistemas hipermídia de aprendizagem permitem ainda que esta se faça em diferentes níveis de detalhes, que são livremente acessados pelos usuários, conforme as experiências e habilidades deles frente a um novo conceito.

Por outro lado, os sistemas hipermídia de aprendizagem também podem proporcionar a navegação linear em *visitas guiadas*, que são seqüências de informações previamente estabelecidas pelo autor. Dentro de uma visita guiada, o usuário só pode avançar para o nó seguinte ou voltar para o anterior. Conforme apontam Rezende e Barros [4], quando os conceitos e estratégias a serem trabalhados nas visitas guiadas são criteriosamente escolhidos, este tipo de navegação pode servir para oferecer contextos que levem o aluno a integrar suas representações do fenômeno (concepções) ao conhecimento científico.

Desde o final da década de 80, a estrutura dos sistemas hipermídia tem atraído a atenção de educadores que vêem, nos mesmos, um grande potencial educacional. Marchionini [5] aponta duas características da hipermídia que são importantes para a educação: (i) a capacidade de armaze-

namento de grande quantidade de informações representadas sob os mais diversos meios, permitindo que conteúdos extensos e variados sejam agrupados e disponibilizados aos estudantes; (ii) o alto nível de controle do sistema pelo usuário, o que torna constante a sua tomada de decisões, a avaliação de progresso e permite o desenvolvimento de habilidades e a escolha de objetivos por parte deste.

A utilização dos sistemas hipermídia na educação pode ser eficaz também para evitar a simplificação de assuntos complexos [6], pois facilitam sua abordagem como um todo e aumentam a

possibilidade do aluno conseguir atingir uma compreensão mais profunda e interdisciplinar.

### Um conjunto de três sistemas hipermídia<sup>5</sup> de Ciências

Os sistemas hipermídia *Força & Movimento*, *Biomec* e *Energia* foram desenvolvidos com diferentes objetivos pedagógicos, tendo em comum, entretanto, a organização do conteúdo e as possibilidades de navegação oferecidas.

Nos três sistemas, o conteúdo abordado foi organizado em três classes de informação, que são acessadas por *índices*<sup>6</sup>. As páginas pertencentes a cada uma das classes, são compostas basicamente de textos explicativos e de animações com as quais o estudante poderá interagir, selecionando variáveis e observando o resultado de sua seleção. A ligação hipertextual entre as páginas é feita por meio de palavras-chave, destacadas pela cor, nos textos explicativos. A *navegação livre*, isto é, a movimentação do usuário em função do seu interesse ou necessidade conceituais, é possível por meio dos índices e das palavras-chave.

Juntamente com a navegação livre, os sistemas hipermídia desenvolvidos oferecem

*visitas guiadas*, disponíveis em algumas páginas, com o objetivo de permitir uma interação mais profunda do aluno com determinado conceito. Os sistemas *Biomec* e *Energia* oferecem glossários, que podem ser acessados por meio de palavras destacadas pela cor e sublinhadas. Os termos que constam do glossário são conceitos complementares ao conteúdo principal, necessários para prover pré-requisitos incompletos, aprofundar ou detalhar aspectos dos conteúdos.

Estes sistemas podem ser utilizados de forma flexível pelo professor, como por exemplo, em uma sessão no laboratório de

informática, na qual o estudante trabalha individualmente ou em duplas a partir de suas instruções. Outra forma de utilizá-los seria em uma projeção em sala de aula durante uma aula expositiva. O professor pode, assim, apresentar animações de situações físicas ou de movimentos humanos com o objetivo de exemplificar conceitos ou de criar contextos para que os alunos exponham suas próprias concepções. Uma sessão de interação no laboratório de informática após uma aula expositiva, pode auxiliar o professor na revisão conceitual de unidades de mecânica básica ou biomecânica.

Os professores dispõem também de uma ferramenta para a avaliação e levantamento das concepções dos alunos que armazena em um arquivo, o nome do usuário, o título das páginas visitadas e o instante em que estas foram acessadas, além de todos os dados digitados durante a interação. Esse arquivo é criado toda vez que os programas são abertos, ficando localizado na pasta onde os sistemas foram gravados.

### O sistema hipermídia *Força & Movimento* (F&M)

O sistema hipermídia F&M aborda conceitos físicos, situações físicas e as

**Multimídia são múltiplos meios usados na representação de uma informação (texto, imagem, áudio, animação e vídeo). Hipertexto é um sistema onde a informação em geral aparece na forma de texto, organizada não-sequencialmente, por meio de ligações entre palavras-chave. Hipermídia pode ser vista como a interseção entre a multimídia e o hipertexto**



Figura 1. Relação entre hipertexto, multimídia e hipermídia.

leis do movimento de Newton. A idéia é que a integração desses conteúdos, representados por textos e simulações de fenômenos físicos, ajude o aluno a compreender as relações entre força e movimento. Seus objetivos específicos são: (i) oferecer contextos para que os estudantes possam expressar suas formas de raciocínio; e (ii) possibilitar a construção de modelos qualitativos mais adequados dos conceitos e leis físicas; (iii) enfatizar a consistência do conhecimento científico por meio da exploração de situações físicas diferentes porém explicadas pelas mesmas leis.

O conteúdo do sistema hipermídia F&M foi distribuído em três classes, que disponibilizam três conjuntos de páginas relacionados entre si: conceitos físicos, situações físicas e leis do movimento. Os conceitos físicos são discutidos qualitativamente, enfatizando-se, na medida do possível, pontos problemáticos das relações entre força e movimento, como por exemplo, a relativa independência entre a força aplicada e a velocidade do corpo – já que elas podem ter sentidos opostos, como no caso da queda de um corpo e pode haver velocidade com força resultante nula – e a relação direta

**A idéia básica do sistema hipermídia F&M é que a integração de conteúdos, representados por textos e simulações de fenômenos físicos, ajude o aluno a compreender as relações entre força e movimento**

entre a força aplicada e o aparecimento de uma aceleração. Os textos explicativos incluem pelo menos uma palavra-chave, que permite a navegação livre para outro conceito relacionado ao atual. Cada conceito pode ser apresentado em uma ou mais páginas. A Figura 2 apresenta, a título de exemplo, as duas páginas que compõem o conceito de *referencial*.

O conjunto de situações físicas apresenta situações físicas selecionadas a partir do resultado de um teste de mecânica básica aplicado a calouros dos cursos de Licenciatura noturna em Física, Química e Matemática da UFRJ, em 1995. Visando ao objetivo de atender a dificuldades conceituais dos estudantes, foram selecionadas as situações exploradas nas questões cuja frequência média de acerto foi

menor do que 50%, o que resultou em um conjunto de seis situações físicas que abordam movimentos em uma e em duas dimensões. Todas as situações físicas foram desenvolvidas em visitas guiadas compostas por 6 ou 7 páginas. A Figura 3 apresenta, como exemplo, a primeira página da visita guiada referente à situação física da *força perpendicular à velocidade* na qual o aluno é solicitado a selecionar a força resultante que age sobre o foguete. Por ser o início de uma visita guiada, os índices estão indisponíveis e a única opção de navegação é por meio do botão seguir.

O conjunto de páginas referentes às leis do movimento apresenta as três leis de Newton. A *1ª lei de Newton* foi desenvolvida em uma visita guiada que mostra inicialmente a simulação da experiência de um disco que desliza sobre uma superfície rugosa, que vai sendo substituída por superfícies cada vez mais lisas. O processo é interrompido e uma pergunta aberta que solicita uma previsão sobre o movimento do disco caso o atrito fosse totalmente retirado. Independentemente da resposta, a próxima página mostra a simulação do movimento do disco sobre uma superfície idealmente sem atrito e o texto explicativo aborda a *1ª Lei*. A *2ª Lei de Newton* é apresentada em uma pequena visita guiada, que discute a experiência de uma mola fixada a um corpo sobre o qual é aplicada uma força e, conseqüentemente, uma aceleração. Essa situação é usada para mostrar que a razão entre diferentes massas é inversamente proporcional à razão entre as acelerações e concluir a expressão da *2ª Lei de Newton*. A situação física utilizada para exemplificar a *3ª Lei de Newton* mostra um trailer sendo puxado por um carro e os pares de força de ação e reação que atuam sobre ambos.

O Quadro 1 sintetiza os conceitos, leis e situações físicas que são abordados nas três classes que compõem o sistema hipermídia F&M.

O Quadro 1 sintetiza os conceitos, leis e situações físicas que são abordados nas três classes que compõem o sistema hipermídia F&M.

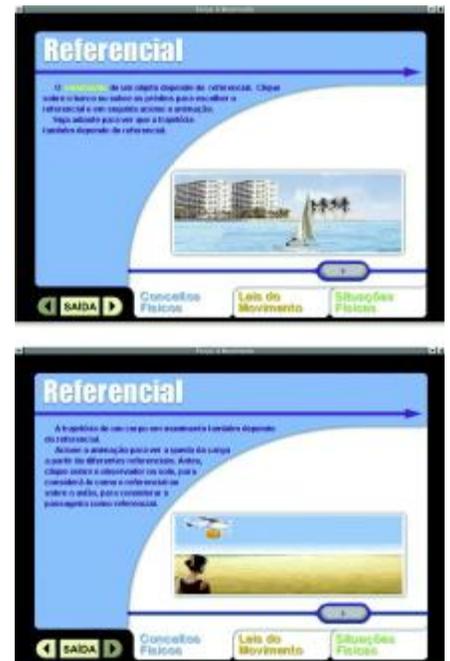


Figura 2. Páginas que compõem o conceito de Referencial.

### O sistema hipermídia Biomec

O sistema hipermídia Biomec aborda aspectos biomecânicos e anatômicos do movimento humano com apoio de conceitos de mecânica. A idéia é que a integração desses conteúdos leve o aluno a entender a biomecânica do movimento humano e suas relações com a mecânica e a anatomia humana, podendo assim vir a favorecer a visão interdisciplinar entre estes conteúdos e atender às necessidades conceituais dos alunos dos cursos de Educação Física e de Fisioterapia. O sistema apresenta conceitos mecânicos, biomecânicos e anatômicos em três classes, que se relacionam entre si: conceitos físicos; aplicações biomecânicas e aplicações anatômicas.

O conjunto de páginas derivado



Figura 3. Primeira página da visita guiada referente à situação da força perpendicular à velocidade.

Quadro 1. Conceitos físicos, situações físicas e leis do movimento abordados no sistema hiperfísica Força & Movimento.

Conceitos físicos	Situações físicas	Leis do movimento
<ul style="list-style-type: none"> <li>• velocidade</li> <li>• aceleração</li> <li>• força</li> <li>• movimento</li> <li>• referencial</li> <li>• força de atrito</li> <li>• distância</li> <li>• tempo</li> <li>• posição</li> <li>• deslocamento</li> <li>• massa inercial</li> <li>• massa gravitacional</li> <li>• inércia</li> <li>• quantidade de movimento</li> <li>• impulso</li> <li>• peso</li> <li>• vetores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• queda livre</li> <li>• lançamento vertical</li> <li>• lançamento horizontal</li> <li>• lançamento oblíquo</li> <li>• força impulsiva perpendicular</li> <li>• à velocidade</li> <li>• força constante perpendicular à velocidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1ª lei de Newton</li> <li>• 2ª lei de Newton</li> <li>• 3ª lei de Newton</li> </ul>

da classe Conceitos de Físicos reúne conceitos envolvidos em movimentos humanos ou que dão apoio à abordagem biomecânica dos mesmos, como por exemplo, o conceito de vetores (Figura 4). O conceito de força é importante na medida em que ajuda o entendimento da força de um músculo e como esta participa da análise biomecânica do movimento. O conceito de momento de uma força e as grandezas relacionadas a este conceito, como o módulo da força e a distância entre a linha de ação e o centro de rotação, são abordados por serem fundamentais para o estudo do movimento humano e dos detalhes anatômicos envolvidos. O conceito de momento de inércia foi abordado para facilitar o entendimento de como a distribuição da massa de um corpo se relaciona com o seu movimento. Finalmente, o conceito de velocidade angular foi escolhido porque, assim como na Física, é importante também para a Biomecânica, a análise da relação entre o ângulo descrito pelo corpo e o intervalo de tempo gasto por este em um movimento giratório, considerando neste processo a participação dos aspectos anatômicos envolvidos.

Para dar uma idéia da classe Apli-

cações Biomecânicas, apresentam-se a seguir, as escolhas de movimentos humanos que enfatizam a aplicação dos conceitos físicos abordados no sistema. A *contração muscular* foi escolhida por ser possível aplicar o conceito de vetor aos aspectos anatômicos nela envolvidos e verificar como a direção, o módulo e o sentido deste se comportam durante o movimento. O movimento de *levantamento de carga* foi incluído porque, do ponto de vista biomecânico, será importante para o aprendizado de como o peso de uma carga, a força de um músculo e as suas características anatômicas, participam do movimento humano. A *flexão do cotovelo* foi escolhida para

mostrar a aplicação de variáveis de natureza mecânica aos aspectos anatômicos envolvidos: como o módulo da força e a distância entre a linha de ação desta e a articulação

influenciam o movimento. O movimento de *locomção* foi abordado para demonstrar como a massa de um corpo e a sua distribuição em relação ao centro de massa a influenciam, ressaltando a importância desses fatores e suas implicações anatômicas no modelo biomecânico do movimento humano. O movimento do *saque* foi escolhido para a análise da relação

**O conceito de força é importante na medida em que ajuda o entendimento da força de um músculo e como esta participa da análise biomecânica do movimento**



Figura 4. As páginas que compõem o conceito de vetores.

entre o ângulo descrito pelo braço do jogador e a velocidade inicial da bola, destacando-se nessa análise, a participação dos aspectos anatômicos. A Figura 5 mostra a página referente ao saque, como exemplo das páginas da classe Aplicações Biomecânicas.

No conjunto de páginas de aplicações anatômicas foram abordados movimentos dos membros superiores e inferiores que se relacionam às apli-

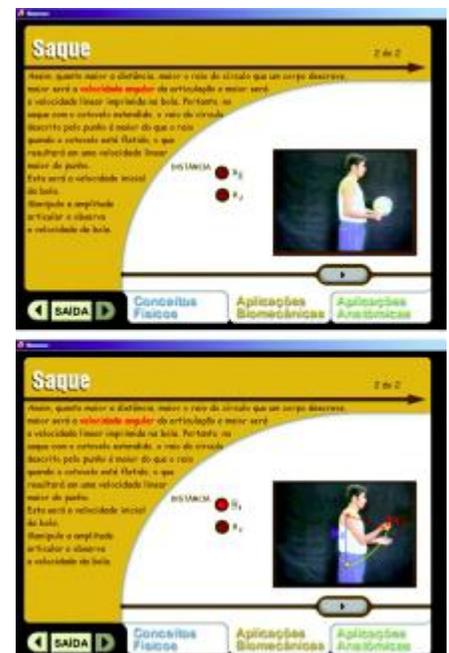


Figura 5. Páginas referentes ao movimento do saque.

cações biomecânicas abordadas no sistema. O músculo *bíceps braquial* foi escolhido porque está diretamente envolvido na flexão do cotovelo, na contração muscular e no levantamento de carga. O *músculo deltóide* foi abordado porque permite discutir os movimentos de levantamento de carga, contração muscular e saque. Os *músculos isquiotibiais* e *glúteo máximo* foram selecionados porque permitem apresentar analogias relacionadas aos conceitos de contração muscular e locomoção.

O Quadro 2 apresenta os conceitos físicos, as aplicações biomecânicas e as aplicações anatômicas que são abordados nas três classes que compõem o sistema hiperfídia Biomec.

### O sistema Energia

O objetivo geral do sistema hiperfídia Energia<sup>7</sup> é mostrar a correlação entre as diversas formas de energia que se manifesta e sua integração conceitual, evidenciada pelas propriedades da energia e suas leis fundamentais. A possibilidade de ligar conceitos, oferecida pela hiperfídia, foi particularmente vantajosa para este enfoque do conceito de energia, dificilmente abordado nos livros didáticos. O conteúdo, representado basicamente por animações, imagens e textos explicativos, foi dividido em três classes: Formas, Leis e Propriedades da Energia. Em todas as páginas é possível acessar conceitos físicos envolvidos na situação abordada, que fazem parte do glossário.

O conjunto de páginas referentes à classe Formas de Energia apresenta as principais formas de energia, buscando-se a relação interdisciplinar entre elas. As páginas de cada forma de energia são acessadas a partir de um índice (Figura 6) composto por animações de fenômenos físicos e químicos que representam diferentes manifestações da energia. A estrutura hipertextual serviu para destacar outros tipos de energia que podem ser considerados, dependendo da ênfase dada, a partir da energia que está sendo enfocada.

**A possibilidade de ligar conceitos, oferecida pela hiperfídia foi particularmente vantajosa para o enfoque do conceito de energia, dificilmente abordado de maneira similar nos livros didáticos**

Quadro 2. Conceitos e aplicações biomecânicas e anatômicas abordados no sistema hiperfídia Biomec.

Conceitos físicos	Aplicações biomecânicas	Aplicações anatômicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• vetores</li> <li>• força</li> <li>• momento de uma força</li> <li>• momento de inércia</li> <li>• velocidade angular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• contração muscular</li> <li>• levantamento de carga</li> <li>• flexão do cotovelo</li> <li>• locomoção</li> <li>• saque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• músculo bíceps braquial</li> <li>• músculo deltóide</li> <li>• músculos isquiotibiais</li> <li>• músculo glúteo</li> <li>• máximo</li> </ul>

O conjunto de páginas relacionadas à classe Leis apresenta as principais leis relacionadas à energia a partir de simulações de situações físicas a serem analisadas pelos alunos, nas quais eles podem controlar variáveis.

O conjunto de páginas referentes à classe Propriedades da Energia se inicia pela imagem de uma montanha à beira mar, sol, ventos e nuvens (Figura 7) que serve para mostrar as relações entre as diversas formas de energia originadas no Sol e na Terra, podendo-se fazer o cômputo quantitativo aproximado da energia total da Terra, através dos dados apresentados. Cada parte da imagem abre uma página que mostra outras imagens representativas e textos explicativos sobre as propriedades básicas da energia.

O Quadro 3 apresenta as formas, propriedades e leis da energia que são abordadas no sistema hiperfídia Energia.

### A interação de estudantes com os sistemas desenvolvidos

A análise dos dados de navegação dos alunos que utilizaram os sistemas

Quadro 3

Formas de energia	Propriedades da energia	Leis da energia
<ul style="list-style-type: none"> <li>• energia cinética</li> <li>• energia potencial gravitacional</li> <li>• energia potencial elástica</li> <li>• energia sonora</li> <li>• energia elétrica</li> <li>• energia luminosa</li> <li>• energia magnética</li> <li>• energia nuclear</li> <li>• energia térmica</li> <li>• energia bioquímica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• conservação</li> <li>• transformação</li> <li>• propagação</li> <li>• armazenamento</li> <li>• degradação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lei de conservação da energia mecânica</li> <li>• leis da termodinâmica</li> </ul>



Figura 6. Índice formas de energia.



Figura 7. Página inicial da classe Propriedades da Energia.

F&M e Biomec mostrou que a maior parte dos alunos conseguiu organizar o conhecimento consistentemente e tirar proveito da estrutura não-linear dos sistemas hiperfídia. Os sistemas hiperfídia F&M e Biomec permitiram interações adaptadas às necessidades conceituais de cada aluno, seja pelo conteúdo selecionado, o

tempo gasto em cada página ou pela ordem em que os conceitos foram visitados.

Foi possível verificar que os alunos usam diferentes estratégias para abordar o conteúdo. A navegação de um dos alunos no sistema F&M, por exemplo, parece ter sido guiada por um planejamento prévio que incluiu visitas a 19 dos 20 conceitos e leis, o

mesmo tempo em todas as páginas e a volta ao índice para escolher a próxima página. Também foi possível identificar, na estratégia usada por dois estudantes, que ambos visitaram, separadamente, um conjunto de

páginas relacionadas à dinâmica e um outro, de páginas relacionadas à cinemática. Os demais estudantes cruzaram alternadamente as páginas referentes às sub-áreas da mecânica. Tanto a estratégia de agregar conjuntos de conteúdo segundo um critério individual, quanto a de cruzar conhecimentos de diferentes sub-áreas do conteúdo são importantes características que diferenciam a navegação hipertextual dos alunos no F&M. Ficou claro que, quando o estudante pode controlar alguns aspectos do conteúdo, como, por exemplo, a ordem segundo a qual ele é apresentado, a organização resultante pode ser diferente daquela que pareceria a mais plausível para o professor.

A partir da análise da navegação apresentados de dois grupos que interagiram com o sistema hipermídia Biomec, pôde-se concluir que os estudantes que apresentavam nível mais estruturado de conhecimento anterior demonstraram interesse em abranger mais conteúdo e participar ativamente da construção do conhecimento viabilizada pelo sistema na medida em que esta experiência foi, provavelmente, vista como auxiliar, ou mesmo como revisão do processo de ensino-aprendizagem. Por outro lado, para os alunos com nível mais baixo de conhecimento anterior, o fato do conteúdo do sistema repre-

sentar ainda uma novidade pode tê-los levado a fazer a opção por uma navegação mais seletiva, provavelmente, orientada por curiosidades e dificuldades conceituais remanescentes do Ensino Médio. Assim, a diferença entre as condições iniciais dos estudantes em termos do conhecimento anterior parece estar diretamente relacionada aos perfis de nave-

**O desenvolvimento de sistemas hipermídia para a educação em Ciências é um trabalho que exige investimento de muito tempo por parte de uma equipe multidisciplinar para se chegar a um protótipo que seja relevante do ponto de vista educacional**

gação observados, como já sugerido pelo estudo de Fitzgerald e Semrau [7].

Com base nos resultados obtidos foi também possível concluir que o sistema Biomec permitiu a compreensão dos aspectos interdisciplinares dos conceitos envolvidos no movimento humano e que a interação com o programa melhorou esta compreensão principalmente por abordar a relação entre conceitos físicos, biomecânicos e anatômicos.

### Considerações finais

A realização deste projeto tem deixado claro que o desenvolvimento de sistemas hipermídia para a educação em Ciências é um trabalho que exige investimento de muito tempo por parte de uma equipe multidisciplinar para se chegar a um protótipo que seja relevante do ponto de vista educacional. Tendo enfrentado essas condições, considera-se que os sistemas hipermídia desenvolvidos representem um conjunto de materiais didáticos inovadores que pode atender à carência de materiais educativos informatizados para o ensino médio e superior.

Do ponto de vista da pesquisa realizada, é possível dizer que houve um avanço do conhecimento sobre a interação de estudantes com sistemas hipermídia, apoiado pelo estudo dos sistemas hipermídia F&M e Biomec. Os resultados obtidos sobre sua utilização trouxeram resultados interessantes que contribuem para a validação deste tipo de material educativo para o ensino-aprendizagem de Ciências.

## Notas

<sup>1</sup>Apoio: CNPq.

<sup>2</sup>Tecnologias da informação e comunicação no ensino de Física: no processo de aprendizagem, na formação e na prática do professor de nível médio. Flavia Rezende, CNPq, 2002 (em andamento).

<sup>3</sup>Navegação é a movimentação do usuário no sistema.

<sup>4</sup>Nós são as unidades de informação que compõem o sistema.

<sup>5</sup>Estes sistemas são distribuídos gratuitamente para escolas públicas mediante uma licença de utilização concedida pelo NUTES-UFRJ à direção da escola.

<sup>6</sup>Índices são estruturas de acesso ao sistema. O conteúdo do índice pode ser organizado segundo uma determinada ordem pré-estabelecida pelo autor ou não, quando organizado na forma de rede.

<sup>7</sup>A versão do sistema Energia descrita nesta seção está sofrendo revisão de sua programação visual, o que no entanto não irá afetar seu conteúdo e as formas de navegação oferecidas.

## Referências

- [1] F. Rezende, Desenvolvimento e avaliação de um sistema hipermídia para facilitar a reestruturação conceitual em mecânica básica. Caderno Catarinense de Ensino de Física, **18**, 197 (2001).
- [2] C.S.D. Cola, Biomec: um sistema hipermídia que integra conceitos de mecânica, biomecânica e anatomia humana. Dissertação de mestrado, NUTES-UFRJ, 2004.
- [3] A.S.Pereira, Desenvolvimento de um sistema hipermídia de aprendizagem sobre Energia para uma introdução à Física. Anais da XXIV Jornada de Iniciação Científica da UFRJ, 2002.
- [4] F. Rezende e S. Souza Barros, Discussão e reestruturação conceitual através da interação de estudantes com as visitas guiadas do sistema F&M. Revista Brasileira de Pesquisa em Ensino de Ciências. ABRAPEC. **1:2**, Maio/Agosto (2001).
- [5] G. Marchionini, Hypermedia and learning: freedom and chaos. Educational Technology **28**, 8 (1988).
- [6] R.J. Spiro, P.J. Feltovitch, M.J. Jacobson and R.L. Coulson, *Cognitive Flexibility, Constructivism and Hypertext: Random Access Instruction for Advanced Knowledge Acquisition in Ill-Structured Domains*, edited by T.M. Duffy & D.H. Jonassen, *Constructivism and the Technology of Instruction: A Conversation* (Lawrence Erlbaum, NJ, 1992).
- [7] G.E. Fitzgerald and L.P. Semrau, The effects of learner differences on usage patterns and learning outcomes with hypermedia case studies. Journal of Educational Multimedia and Hypermedia **7**, 309 (1998).



## Por que e como introduzir a aquisição automática de dados no laboratório didático de Física?

**P**odemos localizar temporalmente a segunda metade do século XVIII como o ponto de partida de um processo de transformação socioeconômica como poucas vezes antes foi vista na história da humanidade, a chamada revolução industrial. Este período foi caracterizado pela substituição do modo de produção artesanal pelo sistema fabril, impulsionado pelo advento das máquinas a vapor. Devido a esta notável evolução tecnológica, hábitos e costumes humanos foram drasticamente modificados, tornando necessária uma adaptação dos sistemas de ensino da época de modo a capacitar os indivíduos a lidarem com esta tecnologia.

Nas últimas três décadas pudemos presenciar outra grande transformação com um impacto gigantesco sobre a estrutura de nossa sociedade como um todo. Desta vez, o computador ocupa o papel principal neste processo, sendo raras as áreas do conhecimento hu-

mano nas quais não está presente. Nas ciências em geral e na Física em particular, o computador vem sendo maciçamente utilizado para a criação de modelos científicos altamente complexos, que não poderiam ser realizados sem o auxílio de algum recurso tecnológico a ele relacionado. Tal importância adquiriu esta ferramenta em nosso cotidiano que poderíamos imediatamente imaginar as mais incríveis transformações que estariam ocor-

rendo em nosso sistema de ensino no intuito de preparar nossos alunos para darem conta desse novo mundo informatizado que os cerca. Entretanto, na escola atual, o computador está sendo explorado prioritariamente na construção de materiais (como textos, apresentações e páginas na *web*), como fonte de consulta de informações e como meio de comunicação. É indiscutível a importância da abordagem de tais temas pela escola, porém visualizamos outras aplicações pertinentes, particularmente ao ensino-aprendizagem de Ciências, que não podem ser suprimidas no Ensino Médio, sob pena de comprometer a formação da cultura científica e tecno-

lógica do aluno, aliando-o da educação e alfabetização científicas [1].

Dentre as diversas aplicações das tecnologias de informação e comunicação na formação do cidadão, destacamos duas como particulares do ensino de Ciências: o computador como

**Nas ciências em geral e na Física em particular, o computador vem sendo maciçamente utilizado para a criação de complexos modelos científicos que não poderiam ser realizados sem o seu auxílio. Entretanto, na escola atual, ele serve prioritariamente como simples fonte de consulta e apresentação de textos**

instrumento para a modelagem científica e como suporte ao laboratório. Neste trabalho nos concentramos no segundo tipo de aplicação, enfocando a aquisição automática de dados no laboratório didático de Física. Nos países do primeiro mundo, isto já vem sendo feito desde o início dos anos 90 [2-3], enquanto nas escolas brasileiras pouco se avançou nesta área. Esta defasagem se deve, primordialmente, a três fatores: i) somente

.....  
**Rafael Haag**

e-mail: haag@if.ufrgs.br

**Ives Solano Araujo**

e-mail: ives@if.ufrgs.br

e

**Eliane Angela Veit**

e-mail: eav@if.ufrgs.br

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....

---

No presente trabalho abordamos o uso de aquisição automática de dados no laboratório didático de Física, apresentando alguns conceitos básicos sobre o tema e exemplos ilustrativos. Diversas referências com detalhes técnicos sobre os sistemas de detecção, sobre os *softwares* utilizados e com a descrição de experiências voltadas para o ensino médio são sugeridas.

nos últimos anos microcomputadores estão sendo introduzidos nas escolas, ii) até recentemente os sistemas de aquisição de dados disponíveis requeriam interfaces externas ao computador, importadas e caras (só muito recentemente surgiram ofertas nacionais) e iii) o desconhecimento por parte da maioria dos professores da possibilidade de confecção de sistemas de aquisição automática de baixo custo e fácil desenvolvimento [4-12] e, especialmente, da possibilidade de uso do próprio microfone [13-17] ou da entrada auxiliar [18] do PC para medida em diversas áreas da Física.

### Por que inserir a aquisição automática de dados no laboratório de Física?

Vários motivos podem ser aventados para introduzir aquisição automatizada de dados em um laboratório didático:

- enriquecer as experiências de aprendizagem propiciando outras alternativas para o aluno compreender e relacionar os resultados obtidos e os conceitos vinculados à fundamentação teórica do experimento e, assim, trazer a Física escondida entre os números e fórmulas para o “mundo real” (Veja Fig. 1) [3];
- permitir a realização de experimentos que envolvam medições de tempo em frações de segundos e a coleta manual é impossível (Veja Figs. 2 e 3) [11-13, 20];
- explorar experiências que re-

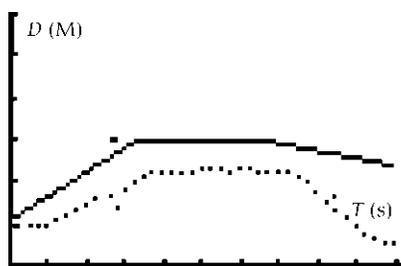


Figura 1. Posição em função do tempo. A linha contínua representa o gráfico de um movimento que se pretende reproduzir e a linha pontilhada é uma tentativa de reproduzi-lo, com um sistema CBL (*Calculator Based Laboratory*) [19]. Resultados de pesquisa mostram que a interatividade do aluno com este tipo de experimento é um fator que contribuiu para a compreensão de gráficos da cinemática [3].

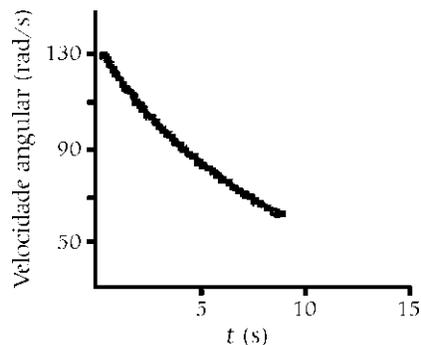


Figura 2. Medidas da velocidade de rotação de um pião. O sistema de detecção envolve um sensor ótico construído com fotodiodos (ou fototransistores). A leitura da entrada digital da porta de jogos é feita com a linguagem *Visual Basic Application*, em uma planilha *Excel*.

queiram um longo período de tempo. Nestes casos, o registro de dados pode ser possível manualmente, mas torna-se tedioso. (Veja Fig. 4.) [21];

- propiciar redução no tempo gasto para a coleta de dados, permitindo que o aluno disponha de maior tempo para desenvolver outras habilidades e competências, como trabalhar com planilhas eletrônicas [12];
- obter mais medidas, com maior precisão e mais rapidamente [4-15].

Outra motivação, que consideramos ainda mais importante, diz respeito à alfabetização científica. Vivenciar processos de medida em tempo real e, simultaneamente, observar na tela de um computador a representação dos dados colhidos, oportuniza uma melhor compreensão não só do estágio atual das Ciências, mas também do que ocorre em um consultório médico, quando são realizadas ecografias, ou nos sistemas de controle de produção em uma indústria

têxtil, por exemplo. Entretanto, para que consigamos atingir este objetivo, o sistema de aquisição não pode ser visto como uma *caixa-preta*. É preciso desmistificar o processo de aquisição automática de dados, permitindo que o aluno manipule os sensores, que faça medidas manuais, para observar o efeito de variações de grandezas físicas sobre os sensores, que trabalhe com sistemas de detecção, que explore *softwares* para, somente então, operar sistemas automáticos de aquisição de dados. Também é imprescindível abandonar os roteiros de laboratório tradicionais, que em muito se assemelham a uma receita de bolo, e introduzir atividades abertas, potencialmente mais propícias para aprendizagem da física envolvida no experimento [22].

### Que tipos de sensores podemos utilizar?

Todo sistema de aquisição de dados necessita de um sensor para converter alguma grandeza física – como temperatura, força, pressão – em um sinal elétrico que posteriormente é entregue ao microcomputador para a coleta e análise dos dados. Atualmente há no mercado uma enorme quantidade de sensores e componentes eletrônicos de baixo custo que podem ser utilizados para este fim. Um simples potenciômetro (resistência variável), se acoplado a uma haste metálica com uma massa na sua extremidade, transforma-se em um sensor que possibilita a leitura da posição angular de um pêndulo em função do tempo [7]. Um termistor do tipo NTC<sup>1</sup> pode ser usado para medida de temperatura<sup>2</sup> [8, 21]. Até mesmo um

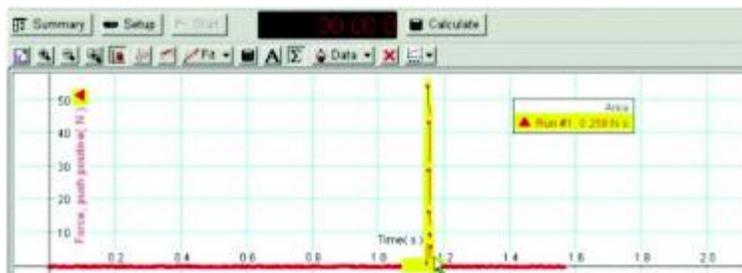


Figura 3. Dados coletados, com um equipamento da PASCO [20], para a força em função do tempo sofrida por um carrinho que sofre uma colisão. O fenômeno em estudo tem duração de centésimos de segundos, e sua detecção só é possível com algum sistema automático de coleta de dados. Neste exemplo, o *software* permite que seja avaliada a área sob a curva, que fornece o impulso.

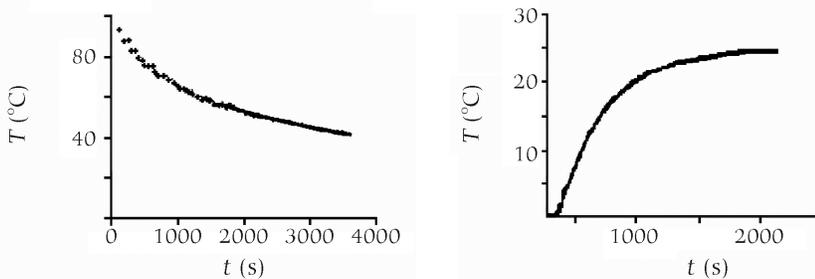


Figura 4. Curva de resfriamento (a) e aquecimento (b) de um líquido. No caso (a) o tempo total da coleta é de cerca de 1h, mas no caso (b) é de mais de 5h [21].

*mouse* com defeito pode ser aproveitado como sensor, bastando para isso, retirar o conjunto de fotodiodos existente no seu interior. Um conjunto de fotodiodo emissor e receptor presta-se muito bem para medidas de tempo [8, 12]. Uma atividade preliminar à aquisição automática consiste em propiciar aos alunos a oportunidade de manipular sensores e, com um multiteste, observar que a variação de intensidade luminosa, por exemplo, produz uma variação da resistência em um LDR<sup>3</sup> ou que a variação da temperatura tem o efeito de variar a resistência de um termistor.

### Sensores digitais e analógicos

Os inúmeros sensores que podem ser utilizados para a coleta de dados se dividem em dois tipos: analógicos e digitais. Os analógicos apresentam resposta contínua em uma larga faixa da grandeza física medida. Por exemplo, NTC's usuais operam na faixa de temperatura de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Já os sensores digitais podem fornecer apenas duas respostas na sua saída: ligado (nível alto) ou desligado (nível baixo). O interruptor de luz é um exemplo de sensor digital. À primeira vista, pode parecer que os sensores digitais não possuem muita utilidade na aquisição de dados, mas este tipo de sensor, se bem empregado, é muito útil para a medida de tempo, velocidade, posição, deslocamento e outras. Na família dos sensores digitais, além dos fotodiodos, há os interruptores magnéticos (também chamados de *reed-switch* ou *reed-relay*), que podem substituir com vantagens as tradicionais fagulhas utilizadas em trilhos de ar [23]. A família dos analógicos inclui termistores, microfones, potenciômetros e vários circuitos integrados.

### Como conectar os sensores ao microcomputador?

O microcomputador é um equipamento eletrônico que, para ser útil, deve receber e transmitir informações ao usuário. Basicamente, todas as entradas que o computador utiliza para receber estas informações, como o *mouse*, teclado, porta de impressora, porta USB, entrada de jogos (*joystick*) e entrada de microfone podem ser utilizadas para aquisição de dados [9]. Cada uma destas portas de comunicação entre o microcomputador e o mundo externo possui características próprias que devem ser observadas cuidadosamente antes de ligar os sensores. Nas Refs. [5-13] encontram-se detalhes para a utilização de várias destas entradas.

### Por que devo usar (ou não) uma interface analógico/digital (A/D)?

Para a coleta de sinais analógicos através do microcomputador há necessidade de alguma forma de conversão deste sinal para a linguagem digital, única que o microcomputador compreende. A Fig. 5 representa simbolicamente a conversão analógico-digital (A/D). O sinal analógico captado, geralmente a diferença de potencial existente entre as extremidades de um sensor, é convertido numa informação binária composta pelos bits 0 (baixo) e 1 (alto), que é coletada por uma das portas de comunicação do microcomputador com o mundo externo. A qualidade<sup>4</sup> desta conversão depende do número de bits utilizados. Quanto maior a quantidade de bits, maior é a semelhança entre o sinal original, presente na entrada do conversor, e o sinal convertido para o forma-

to digital. Se desejarmos coletar dados analógicos, devemos empregar uma interface de conversão A/D para que ele seja compreendido pelo microcomputador. Felizmente, existe uma interface deste tipo em praticamente todos os computadores pessoais: a *placa de som*.

A placa de som, uma das interfaces entre o microcomputador e o mundo externo, possui no mínimo uma entrada e saída de áudio e, usualmente, uma entrada de jogos, com quatro entradas analógicas e quatro digitais, que podem ser utilizadas para aquisição automática de dados. Nas Refs. [7-9] encontram-se detalhes do circuito elétrico da porta de jogos e as respectivas conexões do conector tipo DB15.

As quatro entradas digitais podem ser conectadas a sensores digitais para medida de tempo, por exemplo. As entradas analógicas da porta de jogos possuem uma resolução de 8 bits. Isto significa que é possível medir  $2^8$  (256) valores distintos nesta entrada. Originalmente, cada entrada analógica da porta de jogos foi concebida para trabalhar com um potenciômetro cuja resistência varia desde zero até aproximadamente 100 k $\Omega$ . Assim, se a variação de resistência sofrida pelo sensor ao longo da experiência se aproximar de 100 k $\Omega$ , sem ultrapassar este valor, tem-se a melhor resolução para a conversão analógico/digital possível com este sistema. Neste ponto, o leitor pode perceber que estas entradas analógicas existentes no conector de *joystick*, aceitam somente sensores que se comportam como resistências variáveis, como é o caso dos NTC, PTC, LDR, e potenciômetros. Para usar outros tipos de sensores ou efetuar medidas de tensão, por exemplo, é necessária uma

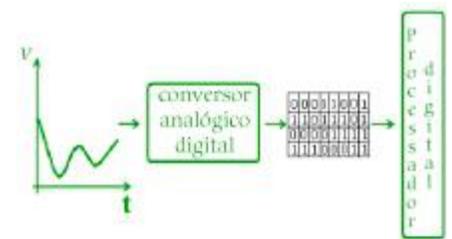


Figura 5. O sinal analógico deve ser transformado em digital para poder ser interpretado pelo computador.

interface A/D mais versátil.

## Pode-se construir interfaces A/D de baixo custo

Até alguns anos atrás, a construção de uma interface analógico/digital era uma tarefa demasiadamente sofisticada para sua implementação pelo professor com pouca aptidão em montagens eletrônicas, pois os componentes envolvidos eram em elevado número e nem sempre disponíveis no comércio eletrônico local. Atualmente podemos montar uma unidade conversora A/D de baixo custo, usando apenas poucos componentes eletrônicos. A Ref. [24] apresenta uma interface que pode ser construída em minutos, pois emprega um único componente eletrônico, o

**Existem diversos softwares disponíveis livremente (freeware) ou parcialmente livres (shareware) na Internet que podem ser usados para aquisição automática de dados**

próprio circuito integrado (TLC548), que é um conversor A/D. O TLC548 é um conversor de 8 bits com um canal analógico de entrada com resposta entre 0 e 5 V e resolução temporal melhor do que 1 ms. Este circuito integrado pode ser ligado diretamente à entrada de impressora do microcomputador e basicamente necessita apenas da alimentação externa de 5 V para operação, simplificando a montagem. Esta alimentação pode ser retirada da entrada de jogos ou de uma bateria de 9 V e um circuito regulador de tensão de 5 V. Existem no mercado várias outras opções de circuitos integrados que podem ser adotados nesta interface.

## Não conheço nenhuma linguagem de programação, e agora?

Existem diversos softwares disponíveis livremente (freeware) ou parcialmente livres (shareware) na Internet - por exemplo nas Refs. [25-30] - que podem ser usados para aquisição automática de dados. Alguns são específicos para a entrada de microfone ou a auxiliar<sup>5</sup> [25-27] outros se destinam à entrada paralela [30] e outros às entradas de jogos [29]. O leitor com alguma noção de programação poderá implementar o seu pró-

prio software, usando LOGO [8, 23, 31], Visual Basic Application [12] ou consultando alguns dos códigos fontes disponíveis na rede. A indústria PICO [30] disponibiliza um software específico para o circuito integrado TLC548 (procure pelo modelo ADC10) que é distribuído livremente na web juntamente com o seu código fonte em várias linguagens, entre elas a VISUALBASIC, DELPHI, C++ e planilha Excel. Esta empresa também comercializa unidades conversoras A/D, porém o custo destas unidades é relativamente elevado em comparação com as unidades produzidas de modo artesanal.

Para fins didáticos, de particular interesse são as alternativas propiciadas por planilhas eletrônicas, pois conforme sugerem Figueira e Veit [12]:

- "são altamente ajustáveis às necessidades em vários campos de atividade, assim como na vida doméstica;
- permitem cálculos numéricos sem conhecimento de qualquer linguagem de programação ou metáfora simbólica;
- cálculos com planilhas costumam ser inteligíveis e apreciados por professores de Ensino Médio, enquanto programas escritos em linguagem de programação não têm a mesma receptividade;
- planilhas eletrônicas propiciam a construção de gráficos".

A linguagem Visual Basic Applica-

tion, que acompanha o Excel, permite que se faça a leitura da portas de jogo, tanto em sua entrada analógica quanto na digital, assim como a leitura da porta paralela (da impressora). As planilhas confeccionadas por Figueira e Veit [12] também se encontram disponíveis livremente em [32].

## Comece pelo mais simples: A entrada de microfone

Se você quer ver resultados de imediato, ponha mãos à obra com um microfone e um software para leitura da entrada de áudio, como o Spectrogram [25], Goldware [26] ou o Aware Audio [27]. Além de experiências em acústica, como a medida da velocidade do som (Fig. 6) e o estudo de timbre de instrumentos musicais (Fig. 7), você poderá fazer experiências de mecânica, como medir o coeficiente de restituição em choques mecânicos (Fig. 8) e determinar a aceleração de

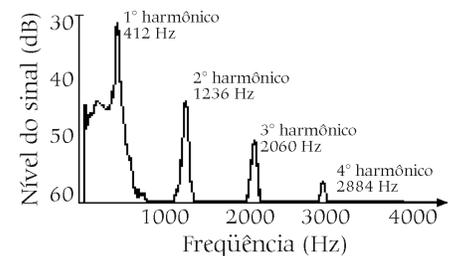


Figura 6. Espectro sonoro produzido em um tubo de PVC [10]. A identificação da frequência dos diversos harmônicos permite determinar a velocidade do som no ar. Cavalcante & Tavolaro discutem em detalhe esta experiência [16].

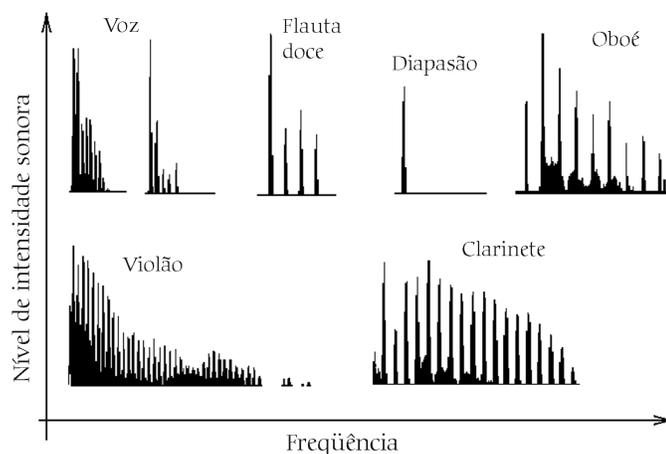


Figura 7 Espectros sonoros de uma mesma nota musical mostram que os instrumentos musicais vibram em várias frequências distintas ao mesmo tempo e que a composição destas frequências, cada uma com sua intensidade característica, é o que define o timbre. Espectros obtidos com o software Spectrogram [24], apresentados na Ref. 10.

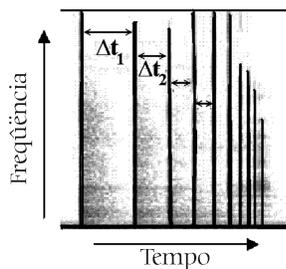


Figura 8 Espectro sonoro de uma bolinha que, largada de certa altura, quica no chão. A partir do intervalo de tempo entre duas colisões sucessivas é possível medir o coeficiente de restituição na colisão. Detalhes na Ref. [13].

queda de um corpo ou a velocidade de uma bola de futebol, que é jogada contra uma parede [9] ou, ainda, investigar a Lei de Faraday-Lenz.

### Outros exemplos ilustrativos

Determinação da velocidade do som no ar: dois microfones conectados à entrada auxiliar do microcomputador detectam um sinal sonoro (som da batida de uma colher em uma tampa de panela). Como os microfones estão situados a diferentes distâncias da fonte geradora do som, um dos microfones detecta o som antes do outro, conforme pode ser visto na Fig. 9. Detalhes são discutidos por Grala e Oliveira [18].

Determinação da pressão de vapor saturado: uma quantidade de água (álcool) é colocada em um recipiente hermeticamente fechado e a pressão de vapor é medida em função da temperatura. Pode-se observar na Fig. 10 que para um mesmo valor de temperatura, a pressão de vapor é maior para o líquido mais volátil, no caso o álcool. Sias e Ribeiro-Teixeira [33] discutem as situações físicas

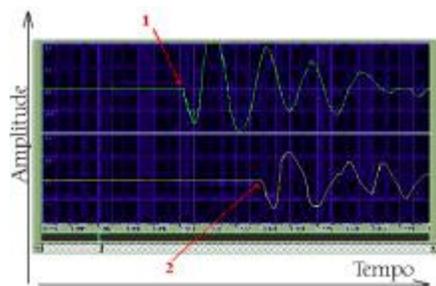


Figura 9. A onda sonora chega no microfone 1 antes de chegar no 2. A medida deste intervalo de tempo permite determinar a velocidade do som no ar [18].

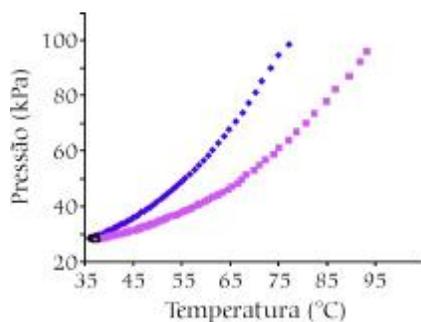


Figura 10. Pressão de vapor para o álcool (azul) e água (cor de rosa) em função da temperatura, obtido com um CBL (Calculator Based Laboratory) [33]. Os dados foram coletados com um intervalo de 1 min, durante 1 h.

representadas por pontos fora da curva, assim como o significado de umidade relativa e de sua medida [33]. Os dados foram coletados com um sistema de aquisição automático (CBL - Calculator Based Laboratory).

### O microcomputador também pode se usado como gerador de sinais

O microcomputador também pode desempenhar a função de um gerador de sinais, desde que se disponha de um *software* apropriado. Por exemplo, Cavalcante e Tavolaro [34] utilizam o *software Sine Wave Generator* [35], para gerar um sinal elétrico com frequência definida, que acoplado a um alto-falante, gera ondas estacionárias em cordas esticadas (veja Fig. 11).

### Nem tudo são flores

O argumento usual de que a introdução do microcomputador como instrumento de medida no laboratório didático de Física, minimizando o tempo necessário para a aquisição dos dados, possibilita um tempo maior para a discussão e análise dos fenômenos físicos, nem sempre é correta. Em atividades que presenciamos em sala de aula com alunos do Ensino Médio [36], este argumento mostrou-se verdadeiro nas experiências de som para as quais não era requerida montagem de sistema de detecção e o sensor utilizado era o microfone, mas não se mostrou verdadeiro em atividades em que a montagem experimental requeria um sistema de detecção óptico construído com componentes ele-

trônicos e a análise envolvia o uso do *Excel*. Os alunos desperdiceram um tempo considerável para começar a tomada de dados, pois não estavam familiarizados com os instrumentos. A nosso ver, esta é mais uma razão para se inserir atividades deste tipo, quer porque a familiarização com os instrumentos necessários ao ensino de Física é um dos objetivos das aulas de laboratório, quer porque os questionamentos levantados costumam ser frutíferos, o que dificilmente aconteceria na obtenção de medidas manuais repetitivas.

Medeiros e Medeiros [37], citando Härtel, enfatizam que “o valor educacional de uma simulação dependerá do fato de ela poder vir a representar para o estudante um papel de auxiliar heurístico e não apenas cumprir um papel algorítmico ou meramente ilustrativo”. Também no caso da aquisição automática esta colocação é pertinente. É por isto que compartilhamos da visão de vários autores [4-12] que evitam tratar o sistema de aquisição automática como uma *caixa-preta* e instigam alunos e professores para que participem ativamente de várias etapas do processo. Como um contraponto ao uso exacerbado dos tradicionais roteiros fortemente estruturados em atividades experimentais de cunho didático, consideramos indispensável a apresentação de alternativas metodológicas que enfatizem a “análise e interpretação dos resultados, a reflexão sobre as implicações destes e a avaliação da qualidade das evidências que suportam as

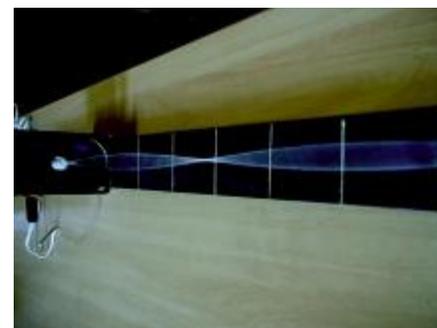


Figura 11. Onda estacionária produzida em uma corda esticada. O lado esquerdo da corda está preso a um alto-falante, que é acionado por um sinal elétrico gerado pelo microcomputador. Fotografia gentilmente cedida por Cavalcante & Tavolaro [34].

conclusões obtidas”, como destaca Borges [22].

## Concluindo

Reiteramos que o uso do computador na aquisição automática de dados é recomendável em medidas que tomam muito tempo ou, ao contrário, precisam ser feitas em frações de segundo; ou, ainda, para experiências

envolvendo um grande volume de dados. Sem dúvida para estes casos, coleta automatizada se mostra de grande valia, livrando o aluno do “trabalho braçal” de anotar os resultados e permitindo que ele se concentre no entendimento da Física relevante ao experimento. Entretanto, devemos tomar cuidado para que o deslumbramento com as enormes

possibilidades fornecidas por esse tipo de ferramenta em um laboratório didático de Física não leve ao seu emprego em experiências simples (do ponto de vista operacional), apenas porque o recurso está disponível. Isto pode mascarar a Física a ser apreendida, tornando o experimento mais difícil para os alunos compreenderem do que o necessário.

## Referências

- [1] S. de S. Barros, *Linguagens Leituras e Ensino de Ciências* (Ed. Mercado de Letras, Campinas, 1998), org. M.J.P.M. de Almeida e H.C. da Silva.
- [2] A. Champagne, L. Klopfer and J. Anderson, *American Journal of Physics* **48**, 1074 (1980).
- [3] R.J. Beichner, The effect of simultaneous motion presentation and graph generation in a kinematics lab. *Journal of Research in Science Teaching* **27**, 803 (1990).
- [4] D.F. Souza, J. Sartori, M.J.V. Bell e L.A.O. Nunes, Aquisição de dados e aplicações simples usando a porta paralela do micro PC. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **20**, 413 (1998).
- [5] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, Projeto Você mesmo experimentos assistidos por computador: construindo sensores e analisando dados, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22**, 421 (2000).
- [6] E. Montarroyos e W.C. Magno, Aquisição de dados com a placa de som do computador, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 57 (2001).
- [7] R. Haag, Utilizando a placa de som do micro PC no laboratório didático de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 176 (2001).
- [8] C.E. Aguiar e F. Laudares, Aquisição de dados usando Logo e a porta de jogos do PC, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 371 (2001).
- [9] C.E. Aguiar, *Ensino*. Disponível em: <http://omnis.if.ufrj.br/~carlos/ensino.html>. Acesso em: 15 de mar. 2005.
- [10] E.A. Veit, R. Haag., R.M.R. Teixeira, I.S. Araujo e P.E.T. Dorneles, *Novas tecnologias no ensino de Física no nível médio*. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef>. Acesso em: 15 mar. 2005.
- [11] W.C. Magno, A.E.P. Araujo, M.A. Lucena e E. Montarroyos, Realizando experimentos didáticos com o sistema de som de um PC, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 117 (2004).
- [12] J.S. Figueira e E.A. Veit, Usando o Excel para medidas de intervalo de tempo no laboratório de Física, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 203 (2004).
- [13] M.A. Cavalcante, E. Silva, R. Prado e R. Haag, O estudo de colisões através do som, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **24**, 150 (2002).
- [14] A.E. Aguiar e E. Laudares, Listening to the coefficient of restitution and the gravitation acceleration of a bouncing ball, *American Journal of Physics* **71**, 499 (2003).
- [15] M.M.F. Saba e A.S. Rosa, The Doppler Effect of sound source moving in a circle, *The Physics Teacher* **41**, 89 (2003).
- [16] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, Medindo a velocidade do som, *Física na Escola* **4:1**, 29-30 (2003).
- [17] L.A. Mützenberg, E.A. Veit e F.L. Silveira, Elasticidade, plasticidade, histerese... e ondas. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 307 (2004).
- [18] R.M. Grala e E. Oliveira, Medida da velocidade do som no ar. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/som/lab/linein/index.html>. Acesso em: 15 de março de 2005.
- [19] D.B. Sias, Guias de Laboratório: movimento. Disponível em: <http://www.cefetrs.tche.br/~denise/guias/movimento.pdf>. Acesso em: 15 de março de 2005.
- [20] Pasco. Disponível em: [http://www.pasco.com/experiments/physics/february\\_2003/home.html](http://www.pasco.com/experiments/physics/february_2003/home.html). Acesso em 15 de março de 2005.
- [21] R. Haag, L.M. Oliveira e E.A. Veit, Utilizando o microcomputador para medidas de tempo no laboratório didático de Física. In: *Atas do 15º Simpósio Nacional de Ensino de Física, Curitiba. CEFET - Paraná* (2003). p. 1302-1310. 1 CD-ROM.
- [22] A.T. Borges, Novos rumos para o laboratório escolar de Ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 291 (2002).
- [23] F. Laudares, M.C.S.M. Lopes e E.A.O. Cruz, Usando sensores magnéticos em um trilho de ar. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 233 (2004).
- [24] R. Haag, Utilizando novas tecnologias no ensino experimental de eletromagnetismo. In: *Atas do 15º Simpósio Nacional de Ensino de Física, Curitiba. CEFET - Paraná* (2003). p. 133-142. 1 CD-ROM.
- [25] R. Horne, *Spectrogram*. Disponível em: <http://www.monumental.com.rshorne/gram.html>. Acesso em: 23 mar. 2005.
- [26] Goldwave Inc., Disponível em: <http://www.goldwave.com/>. Acesso em: 15 de mar. 2005.
- [27] Awave Audio, Disponível em: <http://www.fmjsoft.com/aaframe.html>. Acesso em: 15 mar. 2005.
- [28] K. Zeldovich, *Software Oscilloscope for Windows95, versão 2.51*. Disponível em: <http://polly.phys.msus.edu/~zeld/oscill.html>. Acesso em: 15 de mar. 2005.
- [29] I.S. Araujo, *AQDADOS V2.0: software para leitura das entradas da porta de jogos*. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/material/joystickNTC.html>. Acesso em: 15 de mar. 2005.
- [30] Pico, Disponível em: <http://www.picotech.com>. Acesso em: 15 de mar. 2005.
- [31] Núcleo de Informática Aplicada na Educação (Nied/Unicamp), SuperLogo 3.0. Disponível em: <http://www.nied.unicamp.br>. Acesso em: 15 de mar. 2005.
- [32] J.S. Figueira e E.A. Veit, Planilhas Excel para aquisição de dados. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/excel>. Acesso em: 15 de mar. 2005.
- [33] D.B. Sias e R.M. Ribeiro-Teixeira, Mudança de estado físico. Disponível em: <http://www.cefetrs.tche.br/~denise/guias/>. Acesso em: 15 de mar. 2005.
- [34] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *kit acústica GOPEF/PUC/SP*.
- [35] M. Veldhuijzen, *SINE WAVE GENERATOR: Software gerador de sinais*. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/software/sinewave.zip>. Acesso em: 15 de mar. 2005.
- [36] L.F. da Silva, Uma Experiência Didática de Inserção do Microcomputador como Instrumento de Medida no Laboratório de Física do Ensino Médio. *Dissertação de mestrado, Instituto de Física, UFRGS, 2005*.
- [37] A. Medeiros, e C.F. de Medeiros, Possibilidades e Limitações das Simulações Computacionais no Ensino da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **24**, 77 (2002).

## Notas

1. Termistor com coeficiente negativo, ou seja, quando aumenta a temperatura, diminui a resistência. Do inglês, NTC é sigla de *Negative Temperature Coefficient*.
2. Devemos ter em mente, entretanto, que este tipo de sensor não apresenta uma resposta linear ao contrário do LM35, que também é um sensor térmico, mas com resposta linear numa ampla faixa de temperatura.
3. Resistor com resistência dependente da intensidade luminosa. Do inglês, *Light Dependence Resistor*.
4. Costuma-se chamar de resolução.
5. *Line-in*.



## Espectros e modelos atômicos

**Q**uando Kirchhoff e Bunsen, ambos professores em Heisenberg, deduziram a partir de suas experiências em 1859 que cada elemento emite em determinadas condições um espectro característico exclusivamente desse elemento, descobriu-se não só uma propriedade fundamental da matéria, mas também um poderoso método de análise. Abriu-se então um novo campo de investigação altamente promissor que permitiu, dentre outras coisas, a des-

coberta de um novo elemento até então desconhecido na Terra: o hélio. A descoberta deu-se a partir da análise espectral do Sol, em 1868. É importante notar que praticamente tudo que se sabe sobre a composição química dos astros se deve aos avanços da espectroscopia. Mas as contribuições da espectroscopia são inúmeras. A partir de meados do século XIX, os progressos nas técnicas de espectrometria e a sistematização das medidas permitiram catalogar os diversos comprimentos de onda dos elementos até então conhecidos, bem como a descoberta de novos elementos.

Métodos de espectrometria são hoje utilizados na indústria e em laboratórios de análises clínicas para determinar a composição de uma substância, já que a radiação luminosa emitida é característica da substância que a emite. Em astrofísica, além de determinar a composição e tempera-

tura de estrelas, permite estudar o movimento dos corpos celestes, por Efeito Doppler. Mas foi na física do final do mesmo século e início do século XX, com o estudo do espectro de emissão de um corpo negro, que a espectrometria impulsionou o surgimento do que chamamos de física moderna. Corpos negros emitem, a uma dada temperatura, espectros

**Tudo que se sabe sobre a composição química dos astros se deve aos avanços da espectroscopia, cujas contribuições à Ciência são inúmeras, principalmente na indústria e em análises clínicas**

idênticos, independente de sua composição. Essa característica intrigante o tornou alvo de grande interesse por parte dos físicos teóricos, cujo trabalho consistia em deduzir uma equa-

ção que permitisse calcular a energia emitida pelo corpo negro correspondente a cada um dos comprimentos de onda do espectro da luz por ele emitida. Leis empíricas surgiram do estudo experimental detalhado de corpos negros a temperaturas diferentes. A Lei de Wien mostra uma proporcionalidade entre a frequência na qual a radiação emitida tem intensidade máxima e a temperatura do corpo, isto é:

$$v_{\max} = \frac{1}{b} \cdot c \cdot T$$

( $c = 3 \times 10^8$  m/s é a velocidade da luz no vácuo e  $b = 2,898 \times 10^{-3}$  m.K a constante de Wien).

A lei de Stefan - Boltzman explica o fato de termos um aumento considerável para a intensidade total da radiação emitida pelo corpo negro com o aumento de temperatura, pois a energia total irradiada pelo corpo

.....  
**Marisa Almeida Cavalcante**

e-mail: marisac@puccsp.br  
e

**Cristiane Rodrigues Caetano Tavoraro**

e-mail: cris@puccsp.br  
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo

.....  
**Rafael Haag**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
e-mail: haag@if.ufrgs.br

.....

---

A introdução de física moderna no Ensino Médio é hoje consenso entre os professores de Física, já que o seu entendimento é visto como uma necessidade para a compreensão de fenômenos ligados a situações vividas pelos estudantes, sejam de origem natural ou tecnológica. Muitos esforços têm sido alocados com o objetivo de se desenvolver recursos pedagógicos que permitam aos professores abordar tópicos da Física desenvolvida no século XX [1-17]. Neste trabalho apresentaremos um conjunto de experimentos que permitirá ao professor discutir o conceito de *quantum* de energia. Tais experimentos permitem dentre outras observações determinar através de dois métodos distintos a constante de Planck. Formas discretas de emissão e absorção de radiação e que são manifestações imediatas do *quantum* de energia serão apresentadas utilizando material de baixo custo e de fácil reprodutibilidade. Por outro lado, o instrumental construído nos permite também estudar a emissão e absorção característica de LEDs (*light emission diode*), permitindo a abordagem de conceitos importantes como a ressonância e o princípio de funcionamento de dispositivos semicondutores, fruto das descobertas da física moderna e contemporânea.

negro é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta.

Baseando-se nesses resultados, Max Planck, em 1900, deu um salto qualitativo muito importante para o desenvolvimento da física moderna ao introduzir a hipótese dos quanta na equação do cálculo da energia emitida pelo corpo negro. Segundo a hipótese, a radiação eletromagnética apresenta uma descontinuidade: nasce o fóton de luz de energia  $E = h\nu$  e Einstein, em 1905, utiliza esse mesmo conceito para explicar o Efeito Fotoelétrico!

Concomitante a essas descobertas, a incrível regularidade dos espectros emitidos por gases permitiu que se obtivessem fórmulas empíricas para calcular as frequências emitidas por um dado elemento.

O mesmo conceito de descontinuidade da radiação eletromagnética, aliado à regularidade dos espectros emitidos por gases, levou Bohr, em 1913, a utilizar as fórmulas empíricas dos espectros atômicos na formulação dos seus famosos postulados, dando origem ao primeiro modelo atômico consistente: o modelo para o átomo de hidrogênio.

Vemos, portanto, o papel fundamental desempenhado pela espectrometria não somente como técnica de medida utilizada até hoje mas principalmente como protagonista do nascimento de conceitos e modelos que revolucionaram a Física no século XX!

Na seqüência, apresentaremos

diferentes propostas experimentais que permitem estudar espectros de emissão e absorção e ainda uma proposta de baixo custo para a observação de espectro de absorção.

### Espectros de emissão

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos [10-18] utilizando CDs como redes de difração envolvendo desde a construção de espectroscópios manuais [13-17] até a medida de comprimentos de onda através de anéis projetados [11]. Selecionamos três técnicas distintas de análise e se manuseadas adequadamente permitirão efetuar medidas com elevado grau de precisão.

#### Espectro de emissão por projeção: Feixe refletido

Este método fornece anéis de interferência projetados em uma tela. Os comprimentos de onda da radiação podem ser obtidos a partir da medida do ângulo de desvio de cada anel. Esta técnica de medida é descrita em detalhes por Cavalcante e Benedetto [11]. Uma montagem que permite a visualização destes anéis de interferência pode ser vista na Figura 1.

Valores dos comprimentos de onda podem ser estimados se construirmos uma curva de calibração deste espectroscópio. Para isso basta utilizar como fonte luminosa uma lâmpada eletrônica fluorescente de Hg compacta (aconselha-se no mínimo 24 W),

já que se pode observar nitidamente suas linhas características laranja, verde e violeta, cujos comprimentos de onda são 578 nm, 546 nm e 436 nm, respectivamente.

Em seguida retira-se a fonte calibradora e dispõe-se na mesma posição uma fonte de luz cujo comprimento de onda se deseja medir. O gráfico da Figura 2 mostra a curva de calibração bem como os pontos obtidos para os comprimentos de onda de dois LEDs comerciais, vermelho e verde. Os resultados, 600 nm para o vermelho e 550 nm para o verde, estão próximos dos valores fornecidos pelo fabricante.

#### Espectro de emissão por projeção: Feixe transmitido

Para se obter a projeção do espectro por feixe transmitido usando o CD, é necessário retirar sua camada refletora de alumínio de modo a torná-lo transparente. Para isso, toma-se um CD gravável, recobre-se com fita crepe e faz-se um pequeno corte com um estilete na sua superfície, como indica a Figura 3a. Ao puxar a fita (Figura 3b), esta traz a camada refletora, deixando o CD completamente transparente.

Para a observação do espectro será necessário utilizar uma fonte colimada de luz, uma lupa, um CD transparente e régua. Inicialmente ajusta-se a posição relativa entre tela, fonte e lupa de modo a se obter uma imagem bem nítida da fenda (Figura 4).

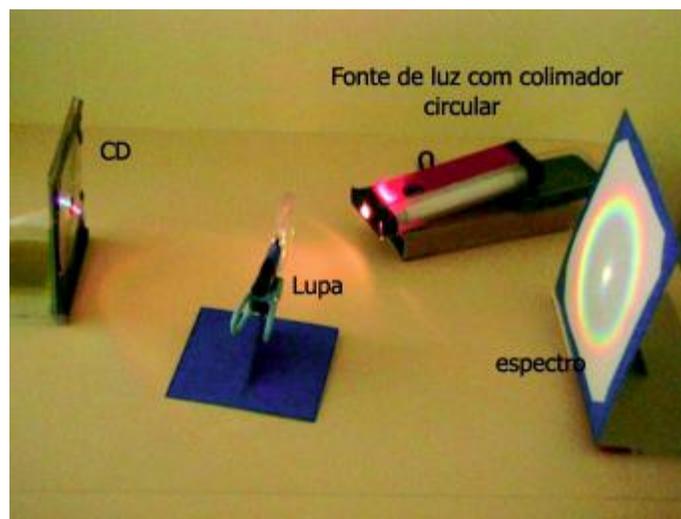


Figura 1. Montagem utilizada para a observação do espectro de emissão por reflexão no CD. Na tela, são observados os anéis de interferência.

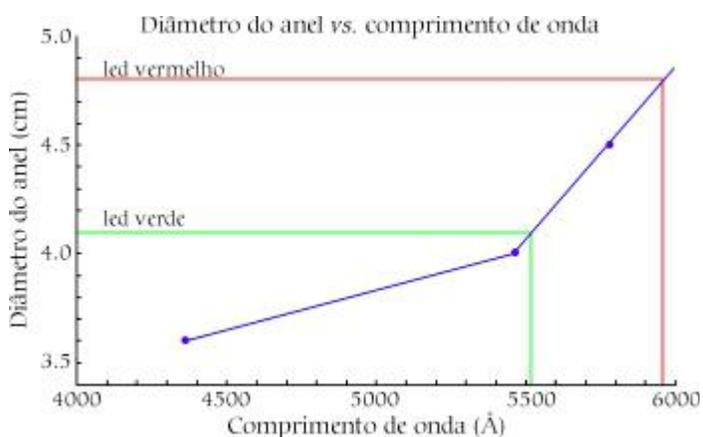


Figura 2. Curva de calibração e determinação dos comprimentos de onda de dois LEDs comerciais, vermelho e verde. Observe os valores obtidos para os comprimentos de onda, cerca de 600 nm e 500 nm, respectivamente, são bem razoáveis e estão de acordo com os valores fornecidos pelos fabricantes.



Figura 3. Procedimento para a retirada da superfície refletora de um CD.



Figura 4. Montagem mostrando o ajuste inicial da imagem da fenda na tela. Algumas vezes a fonte de luz provoca uma luminosidade excessiva na tela prejudicando a visualização das linhas espectrais. Neste caso pode-se reduzir esta luminosidade interpondo uma placa com orifício entre a lupa e a tela, melhorando a visualização do espectro.

Em seguida coloca-se o CD entre a lupa e a tela até que se observe o espectro com nitidez (Figuras 5 e 6).

Para a determinação dos comprimentos de onda devemos medir o desvio de cada linha projetada em relação à fenda, conforme o esquema da Figura 7. A equação que permite calcular o comprimento de onda  $\lambda$  da radiação correspondente à linha escolhida é dada por:

$$N\lambda = d\text{sen}\theta, \quad (1)$$

onde  $N$  corresponde à ordem do espectro que será analisado,  $d$  é a distância entre as ranhuras do CD ( $d = 1/625$  mm pois o CD contém 625 ranhuras/mm) e  $\theta$  é o ângulo de desvio da linha escolhida em relação ao eixo correspondente à fenda projetada. Para determinar  $\text{sen}\theta$ , faz-se

$$\text{sen}(\theta) = \frac{X}{(D^2 + X^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

onde  $X$  é o desvio medido na tela de projeção e  $D$  é a distância entre o CD e a tela (Figura 7).

Para permitir uma comparação entre os resultados obtidos pelo método 1 (espectro de emissão por reflexão) e o método 2 (espectro de emissão por feixe transmitido), obtivemos informações relativas ao comprimento de onda médio emitido por um LED comercial



Figura 5. O CD disposto entre a lupa e a tela para a decomposição espectral.



Figura 6. Espectro de 1ª ordem obtido para o Hg. As linhas que são observadas com maior nitidez são violeta, verde, azul, laranja e vermelha.

vermelho. Para 5.0 cm de distância entre o CD e a tela obtivemos um desvio  $X$  de 2,3 cm, o que conduz a um comprimento de onda médio da emissão igual a 669 nm. A Figura 8 mostra o espectro de 1ª ordem obtido. Para que se obtenha bons resultados, devemos garantir uma boa simetria para estes desvios em relação à imagem da fenda. Desvios simétricos garantem que tanto o CD quanto a tela encontram-se perpendiculares ao feixe incidente.

### Espectroscópio manual

Uma opção muito interessante e bastante funcional para as escolas que não dispõem de laboratórios ou salas escuras para a observação dos espectros de projeção são os espectroscópios manuais. Detalhes sobre a construção de um espectroscópio manual podem ser encontrados em Cavalcante e Tavoraro [16]. A Figura 9 mostra uma foto de um desses espectroscópios. Trata-se de uma caixa em que em uma de suas extremidades é fixado um pe-

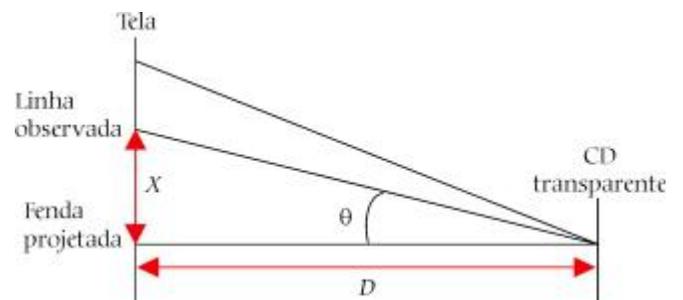


Figura 7. Esquema indica como determinar o comprimento de onda da radiação usando um CD como rede de difração.

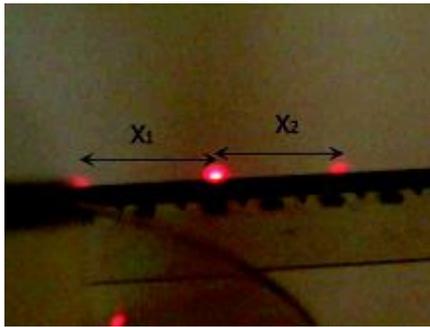


Figura 8. Espectro de 1ª ordem de um LED vermelho. Nesta montagem  $X_1 = X_2$  mostrando uma perfeita simetria, condição necessária para se obter bons resultados. Essa simetria indica que tanto o CD quanto a tela encontram-se perpendiculares ao feixe incidente de luz.

daço de CD transparente e na outra, onde ocorre a incidência de luz, dispomos de uma escala graduada que servirá de tela para a projeção do espectro. A fenda que colima o feixe é ajustada pelo observador, permitindo maior facilidade de manuseio.

Como sugestão, pode-se calibrar a escala a partir da relação expressa na Eq. (1), onde a distância da rede de difração à tela ( $D$ ) é característica de cada caixa (Figura 9). Como a distância entre as ranhuras de um CD é conhecida e assume o valor de  $1,6 \mu\text{m}$ , pode-se obter os valores de cada desvio para comprimentos previamente fixados. Para o espectroscópio da Figura 9 temos  $D = 12,5 \text{ cm}$ , fornecendo a Tabela 1.

A Figura 10 mostra o espectro de uma lâmpada de Hg comercial obtido com um espectroscópio manual.

De modo a permitir comparações com os demais métodos, obtivemos o espectro de um LED vermelho também a partir deste espectroscópio, indicado na Figura 11.



Figura 9. Espectroscópio manual segundo Cavalcante e Tavoraro [16].

Tabela 1. Calibração de um espectroscópio manual com  $D = 12,5 \text{ cm}$ .

$\lambda$ (nm)	$\text{sen}\theta$	$X$ (cm)
400,00	0,25	3,23
450,00	0,28	3,66
500,00	0,31	4,11
550,00	0,34	4,58
600,00	0,38	5,06
650,00	0,41	5,56
700,00	0,44	6,08

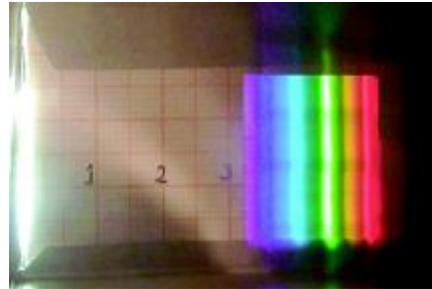


Figura 10. Espectro observado em um espectroscópio manual com  $D = 12,5 \text{ cm}$ .

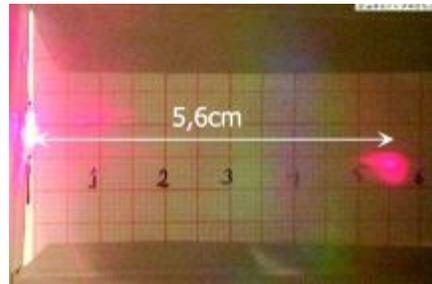


Figura 11. Espectro observado na tela de um espectroscópio manual. Pela tabela de calibração, temos um valor para o comprimento de onda médio de emissão do LED vermelho próximo a  $650 \text{ nm}$ , valor compatível com os anteriormente obtidos.

### Espectro de absorção de gases

Para se obter um espectro de absorção de um gás deve-se fazer com que uma radiação de espectro contínuo e intenso atravesse o gás de modo que este absorva as radiações com energias que lhe são características. Utilizaremos aqui como fonte uma lâmpada de sódio comercial que apresenta uma propriedade muito peculiar e bastante útil para a observação de linhas de



Figura 12. Lâmpada utilizada para a observação do fenômeno de absorção no vapor de Na.

absorção: à medida que aumenta sua temperatura, uma camada de vapor de sódio preenche o espaço entre o bulbo central de emissão e o seu bulbo externo (Figura 12). É essa camada de vapor de sódio que permitirá o processo de absorção.

A Figura 13 mostra o aparato experimental utilizado para a projeção do espectro de Na.

Assim que ligamos a lâmpada observa-se nitidamente as linhas amarelas de emissão do sódio características das transições que envolvem o seu estado fundamental (Figuras 14a e 14b).

No entanto, à medida que a temperatura aumenta inicia-se o processo de absorção das energias características das transições fundamentais e as linhas amarelas desaparecem do espectro conforme mostram as Figuras 15a e 15b.

Uma aplicação importante desse fenômeno reside no estudo dos gases das camadas atmosféricas das estrelas que acabam por absorver certos comprimentos de onda, deixando linhas escuras no espectro observado. Como cada elemento absorve apenas os comprimentos de onda que lhe são característicos, através destas linhas



Figura 13. Montagem utilizada para a observação do espectro de absorção do Na.



Figura 14a. Espectro de 1ª ordem do Na observado através de uma rede de 300 linhas/mm quando ligamos a lâmpada (nos primeiros 30 s).

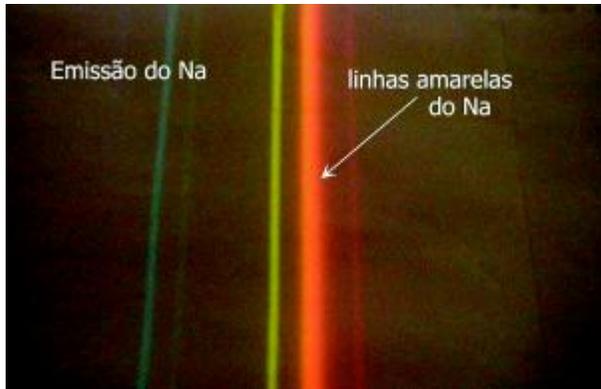


Figura 14b. Espectro de emissão do Na observado após 1 minuto. Após este intervalo de tempo começam a surgir as demais linhas de emissão características do Na.



Figura 15a. Espectro observado transcorrido cerca de 3 minutos em que a lâmpada foi ligada.

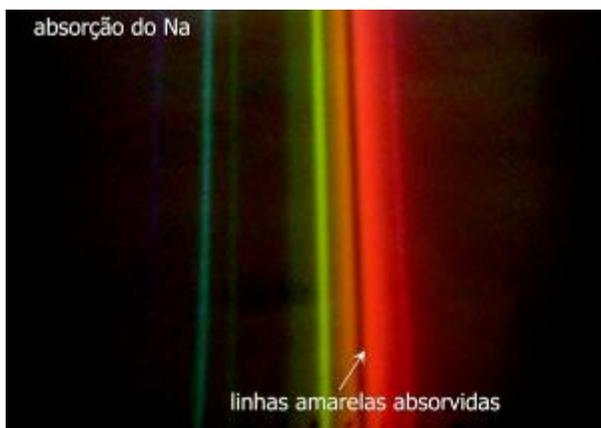


Figura 15b. Absorção das linhas associadas às transições que envolvem o estado fundamental do Na.

absorvidas podemos identificar os gases que compõem essas camadas atmosféricas.

### Determinação da constante de Planck utilizando LEDs

#### Determinação da constante de Planck a partir do espectro de emissão de um LED

A determinação da constante de Planck a partir da radiação emitida por um LED é um método bem conhecido e os detalhes sobre este experimento podem ser vistos em Cavalcante e Tavolaro [6], onde determina-se a constante de Planck a partir de informações relativas à curva característica de um LED. Admite-se que a energia necessária para o acendimento de um LED é no mínimo igual à energia emitida pela radiação de maior intensidade. Podemos portanto dizer que a constante de Planck é determinada a partir da emissão de radiação de um LED.

Um diodo emissor de luz consiste em uma junção entre semicondutores fortemente dopados. De acordo com o diagrama de energias (Figura 16), ao aplicarmos um campo elétrico externo oposto à junção pn, estaremos polarizando-a diretamente, fazendo o diodo conduzir, isto é, a corrente elétrica obtida aumenta com a tensão aplicada.

Dessa forma, os elétrons de condução ganham energia suficiente para vencer a barreira de potencial e caminham para a região p. Podemos ver na Figura 16 que para os elétrons de maior mobilidade penetrarem na região p, a quantidade de energia mínima necessária é dada por:

$$eV_{\text{aplicada}} = E_G + \Delta E_F, \quad (3)$$

onde  $\Delta E_F$  incorpora os efeitos do nível de Fermi e a distribuição de elétrons na banda de condução.

Quando o elétron passar para a região p, podemos ter uma recombinação entre elétrons e buracos e, como consequência, para cada transição teremos a emissão de um fóton com energia  $h\nu$ . Em geral,  $\Delta E_F$  é muito pequeno e pode ser desprezado em primeira aproximação. Admitindo que a frequência de radiação de intensidade

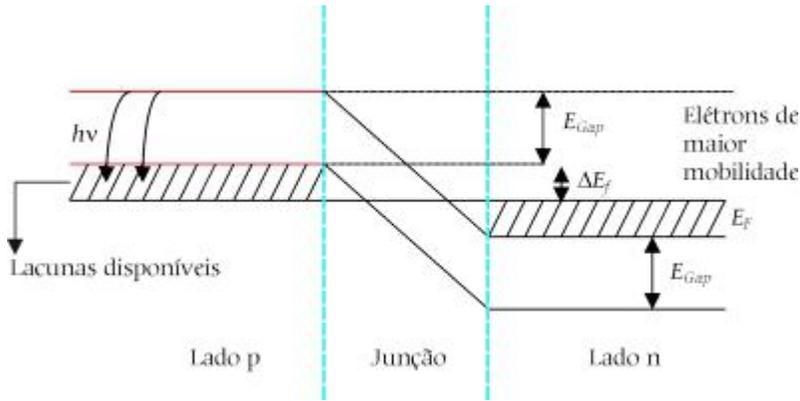


Figura 16. Diagrama de energias para uma junção p-n.

máxima pode ser escrita em termos do limiar de tensão (aquele valor para o qual o diodo começa a conduzir corrente), temos

$$hv = eV, \quad (4)$$

onde  $V$  corresponde ao limiar de tensão aplicada aos terminais do LED para fazê-lo acender e pode ser determinado através da curva característica do LED.

No entanto, caso se tenha interesse apenas em obter informações acerca da ordem de grandeza da constante de Planck, basta variarmos a tensão nos terminais do LED até que a luz emitida possa ser visualizada diretamente.

O esquema do circuito para a obtenção da ordem de grandeza da constante de Planck encontra-se na Figura 17.

O procedimento consiste em alterar a tensão aplicada aos terminais dos LEDs através do potenciômetro até que seja visualizada a luz de emissão de cada LED. O LED de maior comprimento de onda necessita de menor energia para acender. As Figuras 18a e 18b mostram um exemplo de montagem e os valores correspondentes de tensão para acendimento de cada um dos LEDs.

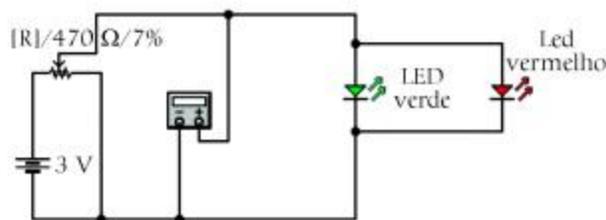


Figura 17. Diagrama elétrico para a obtenção da ordem de grandeza da constante de Planck.

Usando os resultados anteriores para o comprimento de onda do LED vermelho, isto é, um valor da ordem de 650 nm e a Eq. (4), obtém-se para a constante de Planck um valor de:

$$h = eV\lambda/c = 5,7 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Já para o LED verde obtivemos um valor de emissão da ordem de 560 nm, o que nos fornece um valor de  $5,8 \times 10^{-34}$  J.s para a constante de Planck. Estes valores são muito satisfatórios se considerarmos todas as aproximações realizadas.

### Determinação da constante de Planck a partir da absorção de um LED

Um LED, como todo semicondutor, aumenta sua condutividade à medida que fótons de energia correspondente a sua "banda de emissão" incidem sobre ele. Esta propriedade nos permite utilizar um LED como um sensor de radiação com uma resposta espectral definida pela largura de sua banda de emissão. Podemos dizer, portanto, que a corrente elétrica fornecida pelo LED, na incidência de uma radiação ressonante, é proporcional à intensidade de luz incidente.

Os LEDs vêm sendo utilizados como sensores de radiação em fotômetros solares [19-22] desde 1992, apresentando uma largura típica de resposta na região de 550 a 700 nm da ordem de 25 a 35 nm, o que nos permite selecionar adequadamente o comprimento de onda da radiação.

Um experimento muito simples pode ser



Figura 18a. O visor do voltímetro indica o valor de tensão necessária para o LED vermelho acender (1,65 V).



Figura 18b. O visor do voltímetro indica o valor de tensão necessária para o acendimento do LED verde (1,85 V). Observe que o LED vermelho neste caso encontra-se totalmente aceso, já que apresenta comprimento de onda maior e, portanto, requer menor energia para iniciar o seu processo de condução.

realizado de modo a comprovar a propriedade ressonante de um LED como sensor de radiação. Para isso basta conectar os terminais de um LED a um voltímetro (utilize escala máxima de 2 V) e inicialmente verifique sua resposta com o aumento da incidência de luz.

O próximo passo consiste em demonstrar a sua resposta ressonante. Um LED vermelho, por exemplo, responderá apenas a radiação de comprimento de onda na faixa de 600 nm. Para isso disponha diferentes filtros diante do LED e verifique que só se obtém um valor significativo para a tensão de saída na presença de um filtro vermelho. O LED verde, por sua vez, responderá significativamente para o filtro verde.

Uma outra observação muito interessante consiste em incidir sobre o LED verde um feixe de luz de uma ponteira laser. As ponteiros lasers comerciais em geral emitem radiação

de comprimento de onda de 630 a 680 nm, que não é ressonante para o LED verde mas o é para o vermelho.

Mesmo na presença de um feixe bastante intenso quanto o proveniente de uma ponteira laser, o LED verde é praticamente insensível. O único LED que responde de maneira significativa ao feixe da ponteira laser é aquele cuja resposta espectral intercepta a sua faixa de emissão, ou seja, o LED vermelho. Cavalcante e Haag [23] desenvolveram um trabalho que permite determinar a constante de Planck utilizando LEDs como sensores de radiação.

A Eq. (5) é a aproximação de Wien para a energia emitida por unidade de tempo e de área, à temperatura  $T$  e comprimento de onda  $\lambda$  no intervalo  $d\lambda$ , por um filamento de tungstênio aquecido:

$$I(\lambda)d\lambda = \frac{\bar{\epsilon}2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{h\beta c/\lambda}} d\lambda, \quad (5)$$

onde  $I$  é potência emitida pelo filamento de tungstênio, por unidade de área, por unidade de comprimento de onda, em um intervalo de comprimento de onda  $d\lambda$  em torno de  $\lambda$ ,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $T$  é a temperatura em Kelvin,  $\beta = 1/k_B T$ , com  $k_B$  a constante de Boltzmann,  $h$  a constante de Planck,  $c$  a velocidade da luz e  $\bar{\epsilon}$  a emissividade média do tungstênio (praticamente independente do comprimento de onda e da temperatura, que o caracteriza como um “corpo cinza”).

Analisando a equação, percebe-se que o gráfico de  $\ln(I) \times 1/T$  deve nos fornecer uma reta cuja inclinação é dada por  $hc/\lambda k_B$ , permitindo portanto obter informações sobre a constante de Planck.

Nossa proposta é utilizar um LED como sensor da luz emitida pelo filamento e como consequência a corrente gerada será proporcional à intensidade de radiação incidente com comprimento de onda  $\lambda$  no intervalo  $d\lambda$ . O procedimento consiste em obter informações sobre a corrente ou tensão fornecida pelo LED em função da temperatura de aquecimento do filamento. É importante alertar para o fato de que, em geral, essa “fotocorrente” assume valores da ordem de poucos microampères e, como conse-

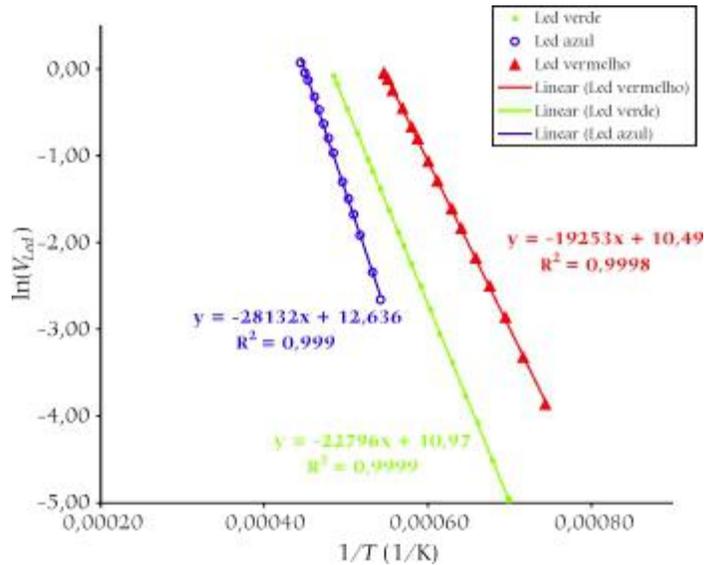


Figura 19. Gráfico obtido para a tensão nos terminais de cada LED em função da temperatura de aquecimento do filamento.

qüência, aconselha-se a utilização de um amplificador. Nos fotômetros solares tem sido utilizado como amplificador o CI 741, na configuração de conversor “corrente x tensão”, onde a corrente gerada é convertida em tensão. Nessa configuração, a tensão presente na saída do amplificador operacional, será linearmente proporcional à intensidade da radiação recebida pelo LED. Um esquema deste amplificador é descrito por Cavalcante e Haag [23]. No entanto é possível também obter medidas de tensão diretamente nos terminais de cada LED. Para isso devemos aproximar o LED da lâmpada de filamento. Ainda assim temos uma redução no número de pontos para baixas temperaturas, já que nesta região há um decréscimo significativo na intensidade de radiação emitida pelo filamento (aconselha-se trabalhar com tensões nos terminais do LED sempre abaixo de 1,0 V).

Os resultados obtidos para os LEDs vermelho, verde e azul estão indicados na Figura 19.

Observa-se facilmente a relação linear entre  $\ln(V_{LED}) \times 1/T$ , indicando a aplicabilidade da aproximação de Wien para o filamento.

Por outro lado, a constante de Planck pode ser obtida a partir da inclinação da reta, sendo dada por:

$$h = \text{inclinação da reta} \cdot \lambda K_B / c, \quad (6)$$

onde, em uma primeira aproximação,  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda da radiação de máxima intensidade emitida pelo LED. A Tabela 2 fornece os resultados obtidos.

Pode-se determinar experimentalmente o comprimento de onda de emissão do LED utilizando qualquer um dos métodos propostos neste trabalho. Os valores dos comprimentos de onda indicados na coluna 2 da Tabela 2, bem como as correspondentes larguras espectrais, foram obtidos por visualização direta através de um espectroscópio manual.

Verifica-se facilmente a partir da Eq. (6), que a relação entre as inclinações das retas obtidas para  $\ln(V_{LED}) \times 1/T$  nos fornece a relação entre as frequências de emissão dos LEDs envol-

Tabela 2.

Cor do LED	Comprimento de onda e largura espectral (nm)	Inclinação da reta	Valor de $h$ ( $\times 10^{-34}$ ) J.s
Vermelho	$649 \pm 24$	19253	$5,8 \pm 0,3$
Verde	$562 \pm 31$	22796	$5,9 \pm 0,4$
Azul	$459 \pm 28$	28132	$5,9 \pm 0,4$

Tabela 3.

Relações	Relação entre as inclinações das retas	Relação entre as frequências de emissão
Verde/Vermelho	1,18	$1,15 \pm 0,08$
Azul/vermelho	1,46	$1,41 \pm 0,11$
Azul/verde	1,23	$1,22 \pm 0,10$

vidos. A Tabela 3 apresenta a relação obtida para cada caso.

Nota-se que a precisão dos resultados obtidos neste experimento está limitada à largura de emissão de cada LED, o que é indicado na 3ª coluna e que para o pior caso nos conduz a precisões da ordem de 8%.

A concordância entre as relações indicadas nas colunas 2 e 3 da Tabela 3 nos leva a crer que os desvios observados para os valores da constante de Planck indicados na Tabela 2 devem ser

atribuídos principalmente a erros na determinação da temperatura do filamento. O cálculo dessa temperatura depende dentre outras variáveis da resistência elétrica do filamento a zero grau Celsius [23] e a estimativa desse valor é bastante difícil de ser efetuada. De qualquer modo, podemos dizer que a aproximação de Wien para a energia emitida pelo filamento foi verificada.

### Conclusão

Neste trabalho procuramos dar

ênfase à caracterização das radiações que compõem o espectro eletromagnético. Os recursos de baixo custo e a metodologia desenvolvida constituem uma ferramenta tecnológica acessível para identificação das radiações no estudo dos mais variados tipos de estrutura, de gases a sólidos incandescentes. Atenção especial foi dedicada aos semicondutores - mostramos que LEDs comerciais podem substituir tanto as fontes como os sensores de luz na incansável e importante tarefa de verificar a validade de modelos através da determinação de constantes físicas: o modelo do *quantum* de luz e a constante de Planck. Dessa forma, esperamos contribuir para o enriquecimento das abordagens experimentais como estratégia para o ensino de física moderna no Ensino Médio.

### Referências

- [1] F. Ostermann, L. Mendonça e C.J.H. Cavalcanti, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **20**, 437 (1998).
- [2] E.C. Valadares e A.M. Moreira, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **15**, 121 (1998).
- [3] C.E. Laburú, A.M. Simões e A.A. Urbano, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **15**, 1192 (1998).
- [4] F. Catelli, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **18**, 108 (2001).
- [5] M.A. Cavalcante, A. Piffer e P. Nakamura, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 108-112 (2001).
- [6] M.A. Cavalcante, C.R.C. Tavoraro, D. de S. Fagundes e J. Muzinatti, *Física na Escola* **3:1**, 24-29 (2002).
- [7] D.B. Junior, *Física Moderna: Tópicos para o Ensino Médio* (Editora Companhia da Escola, Campinas, 2002).
- [8] V.S. Bagnato, *Física na Escola* **1:2**, 4 (2001).
- [9] N. Studart, *Física na Escola* **4:2**, 4 (2003).
- [10] M.A. Cavalcante, V. Jardim e J.A.A. Barros, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 154 (1999).
- [11] M.A. Cavalcante e A. Di Benedetto, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **21**, 437 (1999).
- [12] H.J. Kalinowski e N.M.D. Garcia, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **7**, 64 (1990).
- [13] Garcia, N.M. e Kalinowski, H.J. "*Um espectroscópio simples para uso individual*". *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **11**, 134 (1994).
- [14] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **18**, 298 (2001).
- [15] F. Catelli, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 123 (1999a).
- [16] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *Física na Escola* **3:2**, 40 (2002).
- [17] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *Física Moderna Experimental* (Editora Manole, São Paulo, 2003).
- [18] M.G. Cornwall, *Phys Educ* **28**, 12 (1993).
- [19] F.M. Mims III, *Applied Optics* **31**, 6965 (1992).
- [20] B.Y. Acharya, A. Jayaraman, S. Ramachandran, and B.H. Subbaraya, *Applied Optics* **34**, 1209 (1995).
- [21] T.M. Sansosti, Led's Detectors, <http://laser.physics.sunysb.edu/~tanya/report2/>.
- [22] D.R. Brooks, F.M. Mims III, T. Nguyen, and S. Bannasch, *Globe Annual Meeting, Snowmass, Colorado*, 1998.
- [23] M.A. Cavalcante e R. Haag, XVI Simposio Nacional de Ensino de Física, 24 a 28 de janeiro de 2005, Rio de Janeiro, R.J. Livro de resumos, p. 101. Para acesso ao texto completo na pagina <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/>, sessão A12-1, painel P128.



### Novidade

A Sociedade Brasileira de Química lançou o sexto *Caderno Temático de Química Nova na Escola* e dois CD-Roms especiais: um contendo os fascículos de *QnEsc* de números 1 a 20 e outro contendo os *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola* de números 1 a 5.

Maiores detalhes sobre esta publicação da SBQ, que já está em seu vigésimo primeiro número, pode ser encontrada no sítio da Sociedade:

<http://www.sbfq.org.br>





**N**o dia 24 de janeiro de 1920, quase um ano após a ocorrência do já então famoso eclipse de Sobral, uma carta assinada por Frank H. Dyson era publicada no jornal *Correio da Manhã*. A carta tinha como objetivo agradecer a colaboração prestada pelo seu destinatário, o Dr. José Jacome d'Oliveira, o então prefeito da cidade, aos astrônomos ingleses Charles Davidson e Andrew Crommelin, que foram a Sobral com o intuito de verificar a existência do "efeito Einstein". Além do agradeci-

mento, polido, mas sincero, dadas as dificuldades existentes para a organização de expedições astronômicas, já que elas exigem um grande suporte logístico, a carta transmitia a informação de que "...a Expedição foi inteiramente bem sucedida...". Ou seja,

as fotografias tiradas pelos astrônomos ingleses comprovaram o desvio da luz pela presença de campos gravitacionais intensos.

Obviamente, contudo, não foi apenas o Dr. José Jacome d'Oliveira a única pessoa a contribuir para o sucesso da expedição. Muitas outras pessoas, conhecidas ou não, tiveram papel nesse evento. Cientistas, políticos e a própria população deram a sua parte. A se crer nos relatos dos participantes da expedição inglesa, de fato, a população de Sobral foi muito prestativa, chegando mesmo a acatar sem protestos um pedido, nada trivial de

**A população de Sobral foi muito prestativa, chegando mesmo a acatar sem protestos um pedido feito (em jornal), por Morize: durante o eclipse as pessoas deveriam se manter calmas e em silêncio, o que implicava, por exemplo, não soltarem fogos de artifício, pois estes poderiam atrapalhar a qualidade das chapas fotográficas**

ser obedecido, feito também em jornal, pelo astrônomo brasileiro Henrique Morize, a saber: durante o eclipse as pessoas deveriam se manter calmas e em silêncio, o que implicava, por exemplo, não soltarem fogos de artifício, pois estes poderiam atrapalhar a qualidade das chapas fotográficas. Morize, no dia 24 de maio de 1919, publicou no *Correio da Manhã* um extenso artigo, descrevendo como seria o eclipse. Em particular, por que esse seria o principal objetivo da expedição brasileira, comandada pelo próprio

Morize. Nesse artigo encontramos uma descrição de aspectos visuais interessantes, apresentados pelo Sol durante o eclipse, como as protuberâncias. Morize, e aqui encontramos a explicação para o estranho pedido feito aos moradores de Sobral, ignorando o grau de conhecimento da população a respeito de eclipses, mencionou ainda que eles não erram nocivos à saúde humana.

A colaboração prestada pela população da cidade de Sobral não entrou para a história da Ciência. A rigor, nem mesmo a colaboração prestada por Morize, autor de um relatório minucioso e enviado a vários observatórios, possíveis candidatos para o envio de expedições ao Ceará, uma das melhores regiões para a observação do eclipse, é corretamente citada pelos livros que mencionam esse importante evento astronômico. Pouco importa. Não se trata, no pre-

.....  
**Antonio Augusto Passos Videira**  
 Universidade do Rio de Janeiro  
 e-mail: guto@cbpf.br  
 .....

---

O presente trabalho descreve o famoso eclipse solar total de 1919, importante para confirmar uma das predições da teoria da relatividade geral de Albert Einstein (1879-1955), aquela que afirmava a existência de um desvio da trajetória dos raios luminosos. Em particular, são descritos os eventos acontecidos durante o período de organização das duas expedições inglesas responsáveis pela obtenção dos dados empíricos. Comenta-se também a participação brasileira, bem como a preocupação com o comportamento da população da cidade de Sobral.

sente artigo, de contar a história desse eclipse com o intuito de recuperar a participação de Morize e de outros cientistas brasileiros para sanar uma lacuna nos anais da historiografia da Ciência. O meu objetivo com este trabalho é outro: apresentar fatos relacionados à preparação inglesa para que o eclipse solar total de 29 de maio de 1919 fosse um completo sucesso. Se há uma conclusão a ser enfatizada neste artigo, ela pode ser descrita como: as revoluções científicas, caso existam, são cuidadosamente preparadas.

Como veremos neste artigo, a comprovação da teoria da relatividade geral de Einstein resultou do esforço conjunto de cientistas e não-cientistas de vários países, entre os quais do Brasil e da Inglaterra.

### Einstein e a teoria da relatividade geral

Aproximadamente dois anos após a criação da teoria da relatividade restrita (TRR), entre outros fantásticos resultados obtidos em 1905, Einstein tomou a decisão de resolver um problema que acometia a teoria newtoniana da gravitação. O problema em questão pode ser resumidamente descrito com as seguintes palavras: no quadro teórico da TRR, o conceito de velocidade é relativo, o que não acontece com o conceito de aceleração. Tal situação faz com que o sistema inercial ocupe um lugar privilegiado na teoria newtoniana. Aos olhos de Einstein, essa situação era sinal de que existia uma incompatibilidade de princípios entre a TRR e a teoria da gravitação formulada por Isaac Newton. Sendo um homem de fortes convicções científicas e adepto do uso de princípios como fonte heurística para a prática da Ciência, Einstein recusou-se a aceitar que os sistemas inerciais desfrutariam de uma situação privilegiada quando comparados aos sistemas não-inerciais. Em fins de 1915, após um imenso esforço intelectual e mesmo físico, Einstein tornou pública a sua teoria da relatividade geral (TRG), com a qual propôs tornar os sistemas não-inerciais 'equivalentes' aos sistemas inerciais. Com a TRG, Einstein procurou cons-

truir uma física válida para todo e qualquer sistema de referência.

No processo de construção da TRG, Einstein usou como um de seus pontos de partida uma observação conhecida desde Galileu: no vácuo, todos os corpos caem do mesmo modo, independentemente de suas naturezas. Einstein ficou maravilhado com a exatidão com que essa lei foi verificada. Tal exatidão fez com que suspeitasse que essa lei não descrevia uma mera propriedade dos corpos em queda livre. Na verdade, ela seria um princípio da natureza, denominado por Einstein de Princípio de Equivalência (PE). Sendo um princípio da natureza, o PE deveria ser aplicado à gravitação, apontando para o fato de que as massas dos corpos, que sofrem a ação de um campo gravitacional qualquer, não interfeririam nas equações que determinam os seus movimentos.

Em sua teoria da gravitação, Newton empregou dois conceitos diferentes de massa: a massa gravitacional, responsável pela presença da força da gravidade, e a massa inercial, que representa a reação de um corpo a uma força qualquer. Desde Newton, sabe-se que essas duas massas

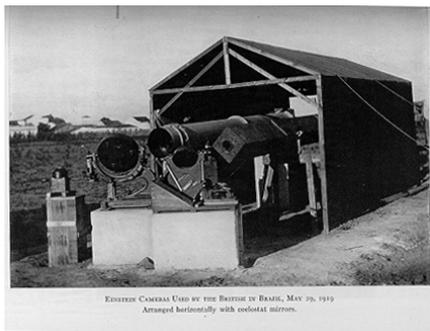
são iguais, o que faz com que as trajetórias dos corpos, sob a ação da força gravitacional (em termos modernos, seria correto falar em campo gravitacional), sejam independentes de suas massas. Essa constatação, já empregada por Newton, ganhou um outro estatuto nas mãos de Einstein, passando a ser considerado um novo princípio físico. De forma muito breve, na gravitação que o físico suíço-alemão propôs em fins de 1915, publicada no início do ano seguinte, os corpos, que se encontram sob a ação de um campo gravitacional, têm as suas trajetórias diretamente determinadas pela massa responsável pelo campo. Uma trajetória, que em uma geometria plana seria retilínea, na teoria de Einstein passou a ser uma geodésica do espaço, tornado curvo devido à presença de corpos maciços.

Desde 1907, ano em que Einstein começou a colocar no papel as idéias que o levariam a TRG, ele tentava extrair algumas conclusões a respeito da gravitação compatibilizada com a TRR. É, inclusive, importante observar que Einstein procurava extrair conseqüências que pudessem ser submetidas ao crivo da experiência. Por essa mesma época, Einstein estava

**Em 1915, após imenso esforço intelectual e mesmo físico, Einstein tornou pública a sua teoria da relatividade geral, propondo tornar os sistemas não-inerciais 'equivalentes' aos sistemas inerciais. Assim, ele procurou construir uma física válida para todo e qualquer sistema de referência**



Equipes brasileira e inglesa em Sobral, entre outras pessoas. Henrique Morize é o quarto, em pé, da esquerda para a direita. Os astrônomos ingleses estão sentados: A.C.D. Crommelin é o quarto da esquerda para a direita; C.R. Davidson é o quinto (Observatório Nacional/MCT).



Eddington Camera Used by the British in Brazil, May 29, 1919  
Arranged horizontally with coelostat mirrors.

Equipamento usado pela equipe inglesa em Sobral (Science Museum/Science and Society Picutre Library).

convencido de que a nova teoria implicaria dois efeitos físicos: 1) os relógios funcionariam mais lentamente nas proximidades de um campo gravitacional intenso e ocorreria uma mudança das frequências em que um átomo emite radiação nas mesmas circunstâncias e 2) o caráter curvo da trajetória da luz no espaço.

Em 1911 Einstein teve uma idéia que lhe permitiu esclarecer o desvio dos raios luminosos ao realizar que poderia aplicar o princípio de Huygens a respeito da propagação em linha reta da luz e as leis de reflexão e refração. Como o efeito é muito fraco, sua medição requer um campo gravitacional muito intenso. Para a sua verificação experimental, seria preciso obter duas fotografias, uma do campo de estrelas durante a passagem do corpo maciço (por exemplo, o Sol) diante dele e outra do mesmo campo de estrelas sem a presença desse corpo, e comparar, nas duas imagens, as posições das estrelas mais próximas da borda desse corpo. Se o efeito existisse, a posição dessas estrelas estaria ligeiramente modificada. Caso o Sol fosse usado como 'corpo teste' para as idéias de Einstein restaria uma outra dificuldade, causada pela luminosidade do Sol, já que esta impediria que as estrelas mais próximas da sua borda fossem fotografadas. Obter as fotografias com o Sol no céu, mas sem a sua luz, seria possível em apenas uma única circunstância: durante um eclipse solar total.

### Sobral e o eclipse

Como físico teórico, Einstein não tinha como conseguir sozinho a veri-

ficação experimental necessária. O primeiro astrônomo que o ajudou foi o alemão Erwin Freundlich, do Observatório de Berlim. A primeira tentativa de Freundlich não deu certo, pois ele usou fotografias de estrelas tiradas por ocasião de antigos eclipses, mas que não foram feitas com o objetivo de calcular o desvio da luz. Para isso, seria fundamental poder registrar imagens por ocasião de um eclipse. A importância do eclipse de 1912, que também foi observado do Brasil - mais precisamente no sul do estado de Minas Gerais - foi que ele se constituiria na primeira tentativa de registrar fotograficamente o desvio. No entanto isso não foi possível, pois no dia do eclipse choveu torrencialmente, impedindo toda e qualquer observação. Registre-se também que o personagem central no eclipse de 1919, Eddington, esteve no Brasil para participar do evento. É provável que o primeiro contato de Eddington com as idéias de Einstein tenha ocorrido nesse momento.

O fracasso do eclipse de 1912 não desanimou a comunidade internacional de astrônomos interessada em comprovar as idéias einsteinianas sobre a gravitação. Pouco tempo depois, Henrique Morize, acionado por Charles Perrine, astrônomo norte-americano e diretor do Observatório de Córdoba, na Argentina, começou a trabalhar em um relatório de modo a apontar as condições que reinariam no Brasil por ocasião do eclipse de 1919, o qual seria excepcional em função do seu tempo de duração. Morize escreveu o tal relatório, o qual foi enviado para vários observatórios no mundo. No seu relatório, Morize indicava que a cidade de Sobral, no Ceará, seria um excelente local de observação.

O relatório de Morize foi acolhido, por exemplo, pelo Joint Permanent Eclipse Committee, órgão oficial da Royal Astronomical Society para eclipses. Na época, o astrônomo real era Dyson, o mesmo que redigiu a

carta de agradecimentos mencionada no início deste trabalho. Eddington era o secretário geral dessa mesma associação. Além disso, ele era catedrático de astronomia na Universidade de Cambridge. Atualmente, sabe-se que foi Eddington o principal responsável pela decisão dos ingleses organizarem e enviarem duas expedições diferentes (uma para Sobral e outra para a Ilha de Príncipe, então uma possessão colonial portuguesa na costa ocidental da África) com o único objetivo de comprovar as idéias de um cientista, ainda que apenas formalmente, oriundo de um país inimigo. Não se deve esquecer que a decisão inglesa foi tomada pouco tempo antes do fim da Primeira Guerra Mundial.

As atividades que Eddington realizou em favor da teoria da gravitação de Einstein foram múltiplas. Ele escreveu um dos primeiros textos introdutórios a essa teoria. Divulgou-a junto aos públicos especializado e não-especializado. Para o eclipse de Sobral, a participação de Eddington foi decisiva, não apenas pela influência que exerceu no comitê permanente de eclipses, mas também porque organizou uma propaganda na imprensa que foi muito favorável à recepção das idéias de Einstein. O cientista inglês, ajudado por colegas e membros da imprensa, montou uma cuidadosa estratégia de propaganda nos jornais britânicos. Durante dez meses, o *The Times* publicou vários artigos tratando do eclipse de 1919.

**Eddington foi o principal responsável pela decisão dos ingleses organizarem e enviarem duas expedições diferentes com o único objetivo de comprovar as idéias de um cientista, ainda que apenas formalmente, oriundo de um país inimigo**

A primeira menção ao eclipse na imprensa foi uma curta nota, intitulada 'Próximo eclipse do Sol', e publicada no dia 13 de janeiro de 1919. Essa nota afirmava que o astrônomo real enviaria proximamente ao norte do Brasil dois astrônomos para a observação do eclipse de final de maio. Três meses depois, um outro artigo, desta feita maior e mais completo, contava sobre os objetivos da expedição, acentuando a sua ligação com

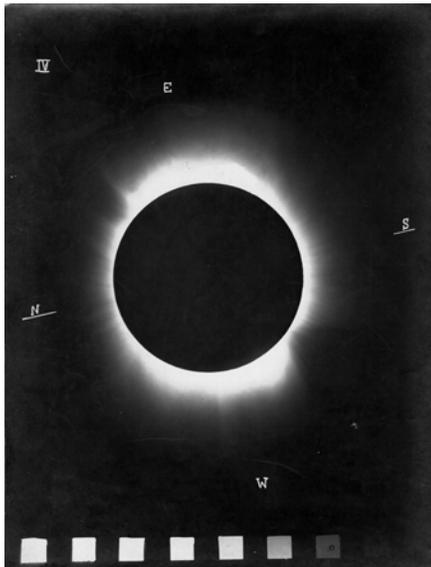


Imagem do eclipse solar de 29 de maio de 1919, foto tirada pela equipe brasileira (Observatório Nacional/MCT).

a teoria da gravitação de Einstein. No próprio dia do eclipse, 29 de maio, saiu uma nota acerca do esquema telegráfico de comunicação entre as expedições e Londres montado para a transmissão de informações relativas ao eclipse. Mesmo após a ocorrência do evento, a população era mantida a par dos trabalhos de análise das imagens obtidas na Ilha de Príncipe e em Sobral. Eddington e Dyson não economizam esforços para criar interesse e expectativa junto à população para os resultados finais.

As duas expedições inglesas embarcaram no dia 8 de março de 1919 para viagens que durariam seis meses; elas se separaram em Lisboa. Duas semanas depois da sua partida, Crommelin e Davidson chegaram ao estado do Pará. Informados de que Morize ainda não chegara a Sobral, os dois partiram para Manaus, onde permaneceram um mês. A expedição inglesa chegou à cidade cearense no dia 26 de abril. Os astrônomos ficaram hospedados na casa de um deputado da cidade, situada em frente à pista de corridas do Jockey Clube, local onde foram instalados os equipamentos usados durante a observação do eclipse.

Segundo o relatório escrito por Crommelin, o dia 29 de maio amanheceu completamente nublado;

algumas horas depois, as nuvens se dissiparam e um clarão abriu-se entre elas. O Sol permaneceu nesse buraco durante praticamente todo o eclipse, possibilitando a realização de fotografias. Do outro lado do Atlântico choveu torrencialmente durante a manhã, mas no momento do eclipse Eddington e Cottingham conseguiram tirar fotografias.

As fotografias, reveladas mais tarde em Londres, apresentaram resultados bem diferentes. daquelas obtidas na Ilha de Príncipe, apenas duas foram usadas, embora registrassem apenas seis ou sete estrelas. A situação em Sobral foi inteiramente outra. Davidson e Crommelin consideraram entre satisfatórias e excelentes as várias placas tiradas com um telescópio de quatro polegadas. Nessas imagens, sete estrelas apareciam nitidamente. Aquelas fotografias tiradas com o astrógrafo de Greenwich continham doze estrelas, as quais apareciam difusamente. A explicação sugerida para isso foi que, no momento do eclipse, a regulação do astrógrafo teria sido alterada em função da queda brusca de temperatura dentro da luneta. Em meados de julho, os dois astrônomos retornaram a Sobral para fotografar o mesmo campo de estrelas, desta vez sem a presença do Sol.

O cálculo da medida do efeito previsto por Einstein não foi um processo simples. Em todas as placas analisadas, as estrelas estavam situadas a alguma distância do Sol. Para calcular o valor do desvio na borda solar era preciso estimar as distâncias de cada uma das estrelas e de seus raios luminosos ao centro do Sol e aplicar a lei do decrescimento do desvio, dada por  $1/r$ . Além disso, era preciso tomar cuidado com deslocamentos ou rotações nas placas e com a aberração e a refração. Realizada a análise, as medidas obtidas

com as fotografias do telescópio de quatro polegadas foram consideradas as melhores, com um desvio médio 1,98 segundos de arco com uma margem de erro de  $\pm 0,12$ . As placas do astrógrafo da Ilha de Príncipe deram um valor médio para o desvio de 1,61 segundos de arco com uma margem de erro de  $\pm 0,30$ . As placas do astrógrafo de Sobral forneceram o valor de 0,97 segundos de arco, o que corresponderia ao valor calculado pela teoria newtoniana. Esse valor, contudo, foi descartado em função da baixa qualidade das imagens. Tal foi, ao menos, a argumentação oficial, o que foi posteriormente contestado. Hoje em dia, permanecem poucas dúvidas com relação ao fato de que Eddington, no que foi acompanhado por Dyson e Davidson, seus companheiros no artigo que apresentou os resultados das expedições, deliberadamente deixou de lado esses resultados.

### A participação brasileira

A expedição brasileira, chefiada por Morize e composta por Lélío Gamma, Allyrio de Mattos, Th. H. Lee e Domingos Costa, chegou a Sobral no dia 9 de maio. Morize publicou, em 1920, na *Revista de Ciências*,

**O dia 29 de maio amanheceu completamente nublado, mas as nuvens se dissiparam e um clarão abriu-se entre elas. O Sol permaneceu nesse buraco durante praticamente todo o eclipse, possibilitando a realização de fotografias. Em meados de julho, os astrônomos retornaram a Sobral para fotografar o mesmo campo de estrelas sem a presença do Sol**

então o órgão oficial da Academia Brasileira de Ciências, um relatório sobre as observações brasileiras. O principal objetivo da expedição brasileira era fazer observações espectroscópicas da coroa solar. Segundo suas próprias palavras: *A forma e a disposição da coroa [solar], assim como*

*a indagação espectroscópica de sua composição constituíram, pois, os dois principais assuntos do programa da Comissão Brasileira em sua expedição a Sobral...*

Apesar de ter enfrentado problemas com alguns instrumentos, a comissão brasileira conseguiu fazer as observações desejadas, o que

permitiu Morize afirmar, em seu trabalho de 1920, que também os brasileiros tinham alcançado os seus objetivos. Afinal, o que estava em jogo, para Morize, em última instância, era mostrar a competência científica dos cientistas brasileiros, bem como a da instituição da qual ele era o diretor: o Observatório Nacional.

### Conclusão: Newton derrubado

A literatura secundária sobre o eclipse de Sobral e a sua contribuição para a confirmação empírica da TRG não deixa dúvidas a respeito do papel de Eddington e da sua preferência por essa teoria em detrimento da gravitação newtoniana. Essa preferência era tão grande que ela levou o astrônomo inglês a deliberadamente escolher as imagens que melhor se adequavam ao propósito de comprovar a 'lei de Einstein', como ele se referia à TRG. No seu trabalho junto à imprensa, Eddington cuidadosa e deliberadamente escolheu um modo de

apresentação das possibilidades de resultados quantitativos que não deixava muitas margens para que a TRG não fosse sancionada pelas conclusões das expedições.

Eddington trabalhou o tempo todo com três possíveis resultados para as medições, todos eles referentes a um raio de luz que praticamente tocasse a borda do disco solar: a) um desvio igual a zero, o que exigiria que se formulasse uma nova compreensão da composição da luz; b) um desvio igual 0,87 segundo de arco (este resultado confirmaria a teoria de Newton); e c) um desvio de 1,75 segundo de arco, explicado pela TRG de Einstein. Ainda que existissem outras explicações potenciais para os diferentes graus de deflexão da luz, tal como, por exemplo, aquela que

**Eddington tinha grande preferência pela teoria da relatividade em detrimento da gravitação newtoniana. Essa preferência era tão grande que ela levou o astrônomo inglês a deliberadamente escolher as imagens que melhor se adequavam ao propósito de comprovar a 'lei de Einstein'**

que a lei de Einstein (era desse modo que ele se referia à TRG) teria sido confirmada pelas expedições. Silberstein não foi, naquele dia, praticamente ouvido. O responsável pela condução dos trabalhos daquela sessão, J.J. Thomson, o descobridor do elétron, se colocou ao lado daqueles três, apesar de reconhecer publicamente que a audiência não tinha capacidade de auferir completamente o sentido das figuras que foram exibidas. Ele confiava na qualidade e na seriedade da análise levada a cabo por Dyson e Eddington.

Após muito tempo de trabalho, o clima estava maduro o suficiente para que se proclamasse que uma revolução na Ciência havia sido realizada. Vista a partir da perspectiva de uma estratégia deliberada e planejada, a manchete do *The Times*, publicada no dia 7 de novembro, não pareceu exagerada: "Revolution in Science – New Theory of the Universe – Newtonian Ideas Overthrown: Revolução na Ciência – Nova Teoria do Universo – Idéias Newtonianas derrotadas". Começava, então, a construção da fama mundial de Einstein.

### Referências

- John Earman and Clark Glymour, The gravitational red shift as a test of general relativity: History and analysis. *Studies in History and Philosophy of Science* **11**, 175 (1980).
- Jean Eisenstaedt and Antonio Augusto Passos Videira, A prova cearense das teorias de Einstein ou como a cidade de Sobral entrou para a história da Ciência. *Ciência Hoje* **20**:115, 25 (1995).
- Henrique Morize: Resultados obtidos pela Comissão Brasileira do eclipse de 29 de maio de 1919. *Revista de Ciências* **3**:IV, 65 (1920).
- Alistair Sponsel, Constructing a 'revolution in science': The campaign to promote a favourable reception for the 1919 solar eclipse experiments. *British Journal of History of Science* **35**, 439 (2002).



Descrição do eclipse e de seus resultados publicado no *Illustrated London News* (Illustrated London News Picture Library).



.....  
**Alexandre Medeiros**

SCIENCO

e-mail: alexandre@scienco.com.br  
.....

**A**noite estava animada ao redor do açude velho de Campina Grande. Camello, Stanley e Jobson, todos professores de Física do Ensino Médio, discutiam as dificuldades da introdução da física moderna em suas aulas. João Tertuliano, nosso anfitrião da UFCG, ouvia atentamente as ponderações dos colegas e refletia com eles sobre o seu trabalho de capacitação de professores naquela área e a sua colaboração comigo e com a Auta Stella. Ao seu lado, o Carlos Ruiz, nosso amigo cubano de Mossoró, explicava ao Jenner e ao Piolho as suas reservas quanto ao conceito de massa relativística. Eu, a Cleide e o Henrique, apenas ouvíamos aquelas duas conversas paralelas. Foi quando o Luis Augusto, ainda preocupado com a conclusão do seu doutorado em ensino de Física na USP, me perguntou se eu já havia escrito aquela entrevista com o Einstein que prometera ao Nelson Studart.

**Alexandre:** Nem me fale nisso, cara! O Einstein é um personagem muito rico e complexo. Eu acho que entrei em uma fria, ao prometer isso. Ainda tenho que ler muito sobre o assunto.

**Cleide:** E além disso, você vai precisar ser bastante seletivo, pois uma entrevista que tente abarcar toda a obra do Einstein, a riqueza da sua biografia e da sua personalidade, ficará, certamente, muito longa. Talvez você tenha que dividir a entrevista em várias outras. E quando quiser escrever a parte de Educação me peça que eu ajudo.

**Alexandre:** Eu acho que seria interessante começar expondo a obra geral do Einstein, a sua contribuição

geral para o nascimento da física moderna, ainda que de forma muito breve, para depois me concentrar nas origens mais específicas da relatividade restrita. Como a Cleide sugeriu, eu poderia desenvolver os outros temas depois em outras entrevistas.

**Lula:** Quais seriam esses outros temas?

**Alexandre:** Tem tantos, que eu até fico confuso. Por exemplo: o papel do Einstein na criação da teoria quântica, a sua educação na escola e na Universidade, a relatividade geral, a sua discordância em relação à interpretação de Copenhague para a mecânica quântica e a sua proposição do paradoxo EPR, polêmica essa que prossegue, após a sua morte, com as desigualdades de Bell, nos anos sessenta. A sua tentativa, sem sucesso, de construir uma teoria unificada de campos e a sua idéia das variáveis ocultas. Isso, além de temas mais gerais, como o seu humanismo, a sua religiosidade cósmica, o seu pacifismo, a sua visão de produção do conhecimento e a sua concepção de Educação. É mole ou quer mais?

**Lula:** Pode parar por ai, você está frito, mesmo.

**Piolho:** Meu amigo, por que você em lugar de se preocupar com tudo isso, simplesmente não entrevista o homem e deixa-o falar livremente?

**Alexandre:** Mas, como?

**Piolho:** Sei lá! Você já não entrevistou outros personagens ilustres que já subiram há muito tempo para o primeiro andar?

**Henrique:** Alexandre! Sabe quem me telefonou agora mesmo e está vindo para cá?

**Alexandre:** Não me diga que foi o

---

Prosseguindo com a série de bem humoradas entrevistas com celebridades da Física, nosso autor-reporter e seus companheiros batem um rápido papinho com Albert Einstein.

Einstein?

Henrique: Que nada! Foi o Nelson Studart, que está de passagem para o Ceará e resolveu dar uma parada em Campina Grande. Eu disse que você estava aqui e ele falou que vem buscar a tal entrevista que você prometeu a ele.

Alexandre: E agora? Já sei! Quando o Nelson chegar, o Henrique finge que é o Einstein e nós entrevistamos ele.

Henrique: Está louco, cara? Estou fora! O que é que eu vou dizer?

João: Olhe aí, gente! Temos uma nova visita chegando.

Nelson: Boa noite, gente. E então, Alexandre, a entrevista já está pronta ou ainda vai começar?

Alexandre: Vai começar agora mesmo, o Henrique vai nos ajudar.

Henrique: Eu vou é pedir emprestado o skate daquele garoto e sair dessa.

Alexandre: Lembre-se do tombo que você levou no Rio de Janeiro ao dar uma de skatista. Você quase quebrou a cabeça.

Cleide: Como assim?

Alexandre: Pois é! O Henrique também engoliu um bocado de água ao tentar surfar na praia do Recreio e para completar ficou completamente zonzinho ao experimentar aquele brinquedo em forma de giroscópio na Exposição Ciência para Todos do Rio-Centro.

Henrique: Não foi tanto assim, mas eu ainda estou meio enjoado.

Nelson: O Henrique sempre foi metido a surfista e skatista, desde que foi meu aluno em São Carlos, ou mesmo antes no Ceará, e já levou muitas quedas e engoliu muita água. É melhor não deixar ele cometer suicídio.

Auta: Lá vai ele! É maluquinho, mesmo. Meu Deus! Olhem o tombo que ele levou! Vamos lá, gente.

Todos se levantam e correm em direção ao Henrique que se encontra caído no chão e desacordado com um enorme galo na cabeça.

Cleide: Henrique, Henrique, você está bem?

Auta: Ele não está falando, gente. Vai ver que foi coisa séria.

Jenner: Henrique, acorde cara, você está bem?

Einstein: Certamente, Herr Bastos! E o senhor, tem ido muito a Zurique?

Piolho: O Henrique pirou! O que é que ele está falando?

Einstein: Herr Bastos, quem é este senhor, que me fala de um modo tão vulgar? Explique a ele que nós dois fomos estudantes na ETH de Zurique. Eu no final do século XIX e o senhor, certamente, muito depois.

Jenner: Bem, eu não estou compreendendo. Eu fiz meu doutorado na ETH, mas você ...

Einstein: Caro Herr Bastos, não me diga que não se lembra de mim. Albert, Albert Einstein, seu colega de profissão.

Piolho: Virgem Maria, o Henrique endoidou mesmo. Vamos dar uma água gelada para ele beber, para ver se melhora.

Alexandre: Nada disso! Se ele pensa que é o Einstein, tudo bem. Melhor assim! Vamos sentar aqui e entrevistá-lo, agora mesmo.

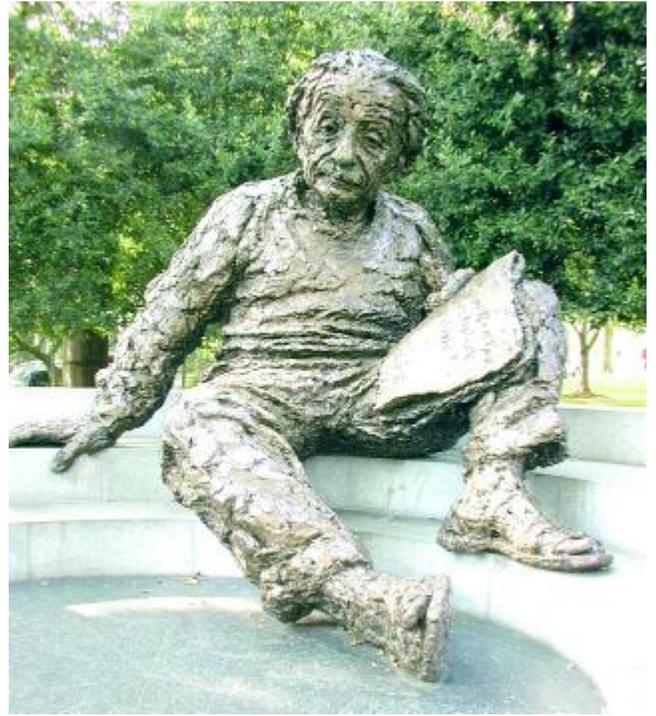
Nelson: Pode ser uma boa idéia; vamos ver no que dá. De todo modo, a revista já está quase pronta.

João: Pois então vamos testar esse nosso Einstein do Paraguai.

Einstein: O que?

João: Nada! Mas, me diga a sua ficha: onde e quando nasceu, onde estudou, coisas assim. Eu quero checar a sua identidade.

Einstein: Eu nasci em Ulm, na Alemanha, em 1879. Ainda muito jovem a minha família mudou-se para Munique, onde recebi a minha sofrida educação básica. Eu detestava aquele rígido padrão educacional germânico. Aos dezesseis anos, meus pais foram para Milão e me deixaram naquele maldito colégio, o Luitpold Gimnasium. Eu, então, inventei uma desculpa, consegui um atestado médico e fui encontrar os meus pais na Itália. Passei um ano inteiro passeando



Estátua em homenagem a Einstein em Washington.

por aquele belo país. Depois disso, meu pai me convenceu a estudar em Zurique, na Escola Politécnica, a ETH. Como eu não havia completado a educação secundária eu precisaria fazer um teste de admissão. Aliás, a ETH era uma das poucas instituições de ensino superior que aceitavam estudantes nessas condições.

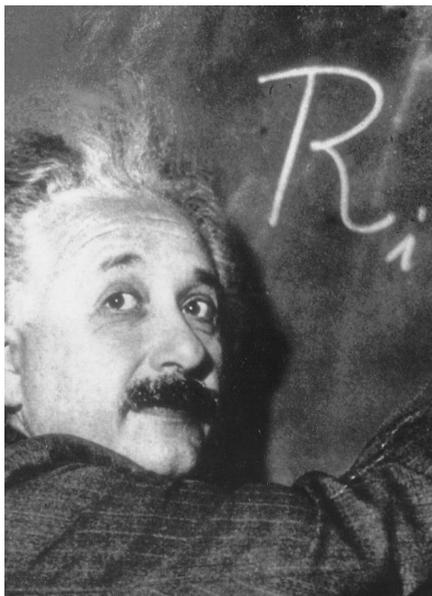
Piolho: O Henrique não me engana. Ele leu isso tudo e está fingindo. Vamos perguntar algumas coisas mais difíceis.

Auta: Pois ele está me parecendo real. Deixe o bichinho falar.

Einstein: Obrigado, Frau Stella. Pois bem, eu fui estudar Engenharia, segundo o desejo dos meus pais, mas mudei de idéia comecei a estudar Física e resolvi ser professor. Fiz o tal teste de admissão, mas não passei. Mas me sai muito bem nos exames de Matemática e de Física, a ponto de impressionar tanto o professor dessa disciplina, o Weber, quanto o próprio diretor da Escola.

Camello: Isso eu já sabia. E então?

Einstein: Então, eu fui estudar na escola cantonal de Aarau durante um ano. Lá concluí os estudos interrompidos em Munique. Voltei para a ETH e finalmente pude entrar, como desejava, no curso de Física.



Einstein lecionando em Princeton.

**Cleide:** Eu gostaria muito de lhe perguntar sobre a sua educação, tanto em Munique quanto em Zurique. As impressões que guardou dos seus professores e como isso veio a influenciar a sua visão posterior da Educação em geral. Temo, entretanto, que tenhamos de ser seletivos e que os meus amigos aqui queiram lhe perguntar outras coisas.

**Einstein:** Certamente, Frau Medeiros. Eu terei o maior prazer de conversar sobre esses temas educacionais e mesmo sobre a minha postura humanista. Eles sempre foram muito importantes para mim. Entretanto, creio que preciso antes conversar sobre alguns temas científicos com os meus colegas físicos aqui presentes para que eles parem de duvidar da minha identidade.

**Cleide:** Tudo bem, depois, então, faremos uma outra entrevista com o senhor.

**Auta:** E sobre os outros detalhes biográficos?

**Einstein:** Eu creio que os colegas estão querendo começar pelos temas científicos, mas, de todo modo, para tratar dos mesmos, eu farei algumas poucas incursões biográficas. Depois discutiremos essas questões biográficas em maiores detalhes.

**Stanly:** Senhor Einstein, eu ensino Física em alguns colégios de Campina Grande e de Caruaru e estou muito preocupado em ter de lecionar física

moderna. Para ser sincero, eu acho a relatividade algo muito abstrato, muito diferente de tudo que eu estou acostumado a ensinar. Eu não compreendo de onde aquelas idéias esquisitas podem ter surgido. Será que dava para o senhor explicar como tudo isso começou?

**Einstein:** Certamente! Eu tentarei discutir isso dentro do cenário mais amplo do que foi a minha contribuição para o advento da física moderna.

**Jobson:** Eu sei que a coisa toda começou com o tal experimento de Michelson-Morley, certo? Foi do resultado negativo desse experimento que a sua teoria da relatividade surgiu, certo?

**Einstein:** Não foi exatamente assim. Para ser sincero, foi de um modo bem diferente. Deixe-me começar falando de um modo geral do nascimento da física moderna, para depois nos concentrarmos no surgimento da Teoria da Relatividade.

**Stanly:** Pois, então, como é que a física moderna surgiu? Eu já ouvi falar em uma história de duas nuvens negras do Kelvin. Como é mesmo isso?

**Einstein:** Isso é um conto da carochinha. Realmente o Kelvin, que era um excelente físico, deu uma palestra no final do século XIX na qual falou, alegoricamente, nessas tais duas nuvens negras e propôs as suas soluções para as mesmas que, em verdade, não deram certo. Há, na verdade, muito mito e exagero em torno dessa história.

**Nelson:** Estou de pleno acordo, eu digo isso freqüentemente em minhas aulas de física moderna. Isso de dizer que todos achavam que a Física estava acabada é mesmo um mito. Entretanto, havia alguns problemas centrais que nortearam o desenvolvimento da física moderna.

**Einstein:** Certamente, Herr Stuardt. O senhor, certamente, se refere aos problemas advindos do estudo da radiação eletromagnética. Foi aí que a polêmica começou. Na verdade, o nascimento da física moderna é decorrente do estudo dos mistérios envolvidos na radiação eletromagnética; dos mistérios da sua natureza e da sua propagação. Quando olhamos para os problemas da propagação da radiação

eletromagnética, e a luz está aí incluída, tomamos um caminho que nos leva diretamente à relatividade. Por outro lado, se nos debruçamos sobre os problemas da natureza da radiação eletromagnética, ou mais especificamente, sobre os problemas da interação da radiação com a matéria, a nossa rota conduz à teoria quântica.

**Camello:** Espera aí! Eu sempre soube que a teoria quântica surgiu do estudo da radiação de corpo negro. Não foi esse o trabalho do Planck? Não foi ele o criador da teoria quântica?

**Einstein:** Bem, a coisa é mais complexa. Na verdade, o problema da radiação de corpo negro, ou seja, o problema de encontrar uma função de distribuição da densidade de energia emitida por um corpo negro, do estudo da sua radiação, surgiu muito antes, com o Kirchhoff. Foi o Kirchhoff quem lançou o célebre problema de encontrar uma função matemática para a radiação que dependesse apenas da freqüência e da temperatura absoluta. Esse problema foi parcialmente abordado pelo Stefan, que foi professor do Boltzmann. O Stefan encontrou uma função para a energia total emitida, aquela coisa de ser diretamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta. Depois veio o próprio Boltzmann que com uma abordagem baseada na mecânica estatística, conseguiu demonstrar a função encontrada pelo Stefan. Essa história é muito longa e merece um estudo mais detalhado. Ela prossegue com a descoberta, pelo Wien, de uma lei para o deslocamento das raiais espectrais da radiação do corpo negro, seguida por uma verdadeira função para a radiação. E como vocês sabem, os estudos experimentais mostraram que a lei de Wien não valia na faixa das baixas freqüências. É nesse ponto que se insere a contribuição do Planck.

**Camello:** Eu acho que o senhor pulou a questão da equação de Rayleigh-Jeans, da catástrofe ultravioleta, não? Que eu saiba, o Planck introduziu a sua hipótese da quantização da energia para resolver a tal catástrofe ultravioleta.

**Einstein:** Isso é um outro mito, uma outra história da carochinha.

**Nelson:** Concordo! Eu até escrevi

sobre isso um dia desses.

Einstein: Eu sei, eu li o seu artigo, mas eu já conhecia essa história antes.

Nelson: Certamente, Herr Einstein!

Jobson: Eu não estou entendendo mais nada! Afinal, o Planck resolveu ou não a tal catástrofe ultravioleta?

Einstein: Nunca houve isso de problema de catástrofe ultravioleta. Esse nome foi inventado bem posteriormente pelo meu amigo Paul Ehrenfest. Além disso, há alguns detalhes importantes a serem considerados nessa história. Em primeiro lugar: a tal equação de Rayleigh-Jeans, como os livros didáticos de vocês costumam chamar, é posterior ao trabalho do Planck, de 1900. O Jeans corrigiu em 1902 um expoente errado na equação do Rayleigh e assim sendo a denominada equação de Rayleigh-Jeans nem existia em 1900.

Jenner: Mas, Herr Einstein, se não formos tão exigentes, a equação do Lord Rayleigh já existia na época do trabalho do Planck.

Einstein: Certamente, Herr Bastos, mas o senhor sabe muito bem que ela não se constituía em nenhum problema para o Planck, pois o trabalho do Lord Rayleigh estava todo fundamentado na mecânica estatística de Boltzmann, na versão estatística da Segunda Lei da Termodinâmica, na concepção probabilística do conceito de entropia. E isso o Planck não aceitava de modo nenhum. Eu não deveria estar falando dessas coisas, mas é preciso salientar que o trabalho do meu grande e estimado amigo Planck foi excessivamente parcial. Ele não disse, como afirmam muitos livros didáticos de vocês, que a energia era quantizada.

João: Como, não? Se não foi ele o pai da teoria quântica, quem foi então?

Einstein: Olhe! O Planck certamente conhecia o trabalho do Rayleigh e nós podemos até admitir que ele tenha de fato feito uma interpolação matemática entre duas equações: a de Rayleigh e a de Wien, que valiam em faixas opostas do espectro emitido pelo corpo negro. Entretanto, a fórmula assim obtida por ele em outubro de

1900, embora desse conta matematicamente do problema da radiação de corpo negro, não tinha ainda uma fundamentação física consistente. Foi apenas nesse intervalo até dezembro de 1900 que o Planck, em desespero, ousou apelar para a mecânica estatística do Boltzmann e conseguiu assim encontrar uma justificativa aceitável para a sua lei da radiação.

Piolho: Isso nós sabemos, Herr Einstein. Mas, assim fazendo, ele não se viu forçado a introduzir a hipótese da quantização da energia? Foi assim que eu aprendi nos livros de estrutura da matéria.

Einstein: Mas, Herr Piolho. Desculpe, é esse mesmo o seu nome?

Piolho: É! Prossiga!

Einstein: Pois bem, o que o meu caríssimo amigo Planck supôs, e ainda assim em desespero de causa, foi apenas que as energias dos osciladores das paredes da cavidade eram quantizadas. Ele não afirmou, como você falou, de um modo geral, que a energia era quantizada. A simples idéia de que a energia se propagasse de forma discreta lhe causava horror. E ainda assim, ele durante muito tempo tentou livrar-se daquela hipótese que lhe parecia incômoda, que lhe parecia uma mera hipótese heurística. Vários livros de vocês dizem que a hipótese do Planck não foi, de início, bem aceita. Isso é verdade. Entretanto, nem o próprio Planck pareceu apreciar aquilo que lhe parecia um mero artifício de cálculo a ser posteriormente removido.

Auta: Mas, se não foi o Planck quem introduziu de fato a hipótese da quantização da energia, de uma forma geral, de uma forma abrangente, que incluísse a sua propagação, quem foi que fez isso?

Einstein: senhorita, por favor, não me pergunte isso. A modéstia me impede...

Nelson: Eu estou de pleno acordo com o senhor. A hipótese da quantização da energia em sua forma mais abrangente é realmente sua.

Alexandre: Eu diria que o senhor é o verdadeiro pai da teoria quântica, que o Boltzmann é provavelmente o avô e o Planck é, quando muito, o tio. O Planck, inclusive, não gostou muito

dessa sua hipótese, não foi?

Einstein: Isso! Ele ficou terminantemente contra a minha idéia dos quanta de luz, que depois seriam denominados de fótons, já nos anos 20.

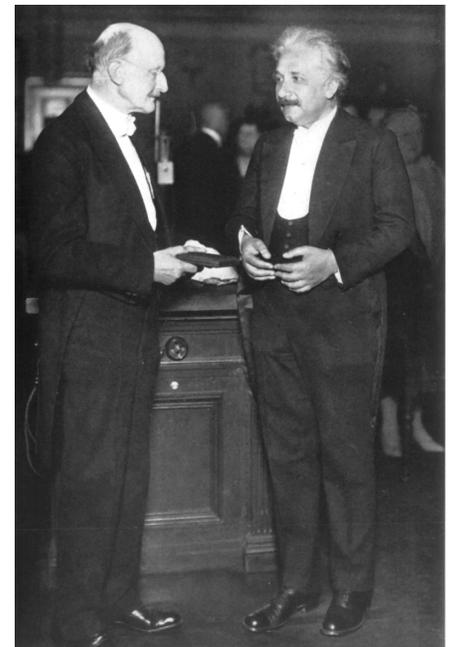
João: Ele e toda a torcida do Flamengo.

Nelson: Não apenas a torcida do Flamengo, a do Corinthians, a do Vasco, a do Santos, a do Palmeiras... Acho que só a turma do Canto do Rio ou a do Íbico concordou com o Einstein.

Risos...

Einstein: É, de início foi mesmo assim. Em 1909, quando eu apresentei a minha teoria das flutuações, que antecipava em muitos pontos as idéias do De Broglie, em um Congresso na Áustria, o Planck colocou-se vigorosamente contra a minha idéia dos quanta de luz. Ele achava a idéia da quantização geral da energia, senão absurda, no mínimo completamente desnecessária. Ele parece só ter começado a mudar a sua atitude após o primeiro Congresso Solvay, em 1911. Não sei, entretanto, se ele de fato passou a aceitar a idéia da quantização da energia como algo incorporado firmemente à sua estrutura de pensamento ou teve de resignar-se com uma aceitação cada vez mais ampla dessa idéia.

Jenner: Entretanto, em suas memórias, escritas já nos anos 30, o



Planck e Einstein.

Planck se reporta a uma conversa com o filho dele, o Erwin, logo após o trabalho que ele havia apresentado em dezembro de 1900, na qual ele teria se referido à hipótese da quantização por ele introduzida, como algo revolucionário e bastante promissor.

Alexandre: Eu também já li isso, mas não me convenci de sua exatidão. Eu acho que ele reescreveu a sua própria história. Os seus depoimentos até 1911 depõem contra essa sua versão posterior constante em sua autobiografia.

Piolho: Quem sabe ele fez isso para aparecer melhor na fotografia.

Einstein: Não concordo! O Planck foi uma das personalidades mais éticas que eu conheci em toda a minha vida, um verdadeiro exemplo de pessoa humana digna. Se ele cometeu esse tipo de falha em suas memórias, a explicação deve ser outra.

Nelson: Não se aborreça Herr Einstein, o nosso amigo Piolho estava brincando. Todos nós admiramos muito o senhor e o Planck. Mas, me diga uma coisa, só para satisfazer a minha curiosidade. O senhor, nas suas viagens, conheceu a Dona Fifi? A Dona Fifi foi uma brasileira que viajou pela Europa no início do século XX e conheceu muitos físicos importantes. Ela era um tanto namoradeira e não era um tipo fácil de esquecer.

João (sussurrando): Eu nunca ouvi falar dessa tal Dona Fifi.

Nelson (sussurrando): Fala baixo, a Dona Fifi é um personagem inventado por um amigo meu da Universidade Federal do Ceará, o Evangelista.

Einstein: Bem, quando eu me separei da minha primeira esposa, a Mileva e antes de me casar com a Elza, minha segunda esposa, você sabe... Bem, eu conheci algumas senhoras em Berlim, mas eu não me lembro bem dessa tal Dona Fifi. Acho que você deveria fazer essa sua pergunta ao Schroedinger. Ele provavelmente deve ter conhecido.

Stanly: Não entendi porque.

João: Deixa para lá, Stanly.

Lula: Mas, me diga uma coisa, o senhor não falou que ia dizer como a física moderna surgiu e logo em seguida iria entrar na questão mais específica de como a relatividade

surgiu?

Einstein: Foi, mas tudo isso se deveu a que vocês me perguntaram sobre o papel desempenhado pelo estudo da radiação de corpo negro no surgimento da física moderna.

João: Pois bem, isso nós já entendemos. Já está bem claro que foi desse estudo que surgiu a teoria quântica e que a explicação mais completa foi sua e não exatamente do Planck.

Einstein: Espere um pouco, eu não disse exatamente isso. Eu estava falando no início que a teoria quântica surgiu do estudo dos mistérios da interação da radiação eletromagnética com a matéria.

Ruiz: Mas o estudo da radiação de corpo negro se insere, exatamente, nessa questão do mistério da interação da radiação eletromagnética com a matéria.

Einstein: Certo, certíssimo, mas não se resume a isso. Havia, também, o mistério do efeito fotoelétrico, descoberto pelo Hertz em 1887. O efeito fotoelétrico também é um exemplo importante de um fenômeno misterioso envolvendo a interação da radiação eletromagnética com a matéria. E nesta mesma linha havia ainda o mistério da variação dos calores específicos atômicos, que não obedecia à lei de Dulong-Petit, e também o mistério da luminescência, aí incluídas a fosforescência e a fluorescência. Esses quatro mistérios, entretanto, apesar de estarem todos relacionados às formas de interação entre a radiação e a matéria, eram tratados, até então, de modos diversos. Cada um tinha a sua forma específica de ser abordado. O que faltava não era apenas uma explicação isolada e bem sucedida para cada um deles, mas, sobretudo a compreensão de que todos eles eram facetas diferentes de um mesmo tipo de mistério. Esse foi um dos meus trabalhos de 1905, justamente aquele que depois me valeria o prêmio Nobel.

Jenner: Mas, Herr Einstein, o senhor não ganhou o prêmio Nobel justamente pela explicação do efeito fotoelétrico?

Einstein: É verdade, Herr Bastos, mas o trabalho premiado era bem mais geral, não era apenas sobre o efeito fotoelétrico. Com a minha hipó-

tese geral da quantização da energia, eu reconstruí de forma mais rigorosa o caminho para a solução do problema da radiação de corpo negro, do mistério da luminescência, da variação dos calores específicos atômicos e finalmente do efeito fotoelétrico.

João: Poderíamos, então, dizer, que você colocou quatro bolas na cesta com uma só tacada.

Einstein: Se você quiser entender assim, foi. Mas eu não me vangloriei jamais desse feito. Eu sempre achei que a grandiosidade da inteligência humana está justamente no fato dela ser suficiente para percebermos o quão pequena ela é para dar conta dos mistérios do Universo. O maior exemplo de inteligência está na humildade. A humildade, para mim, sempre foi uma ponte entre a minha religiosidade cósmica e a minha visão de produção do conhecimento. Para mim, o grande mistério sempre foi que o mundo pudesse ser compreendido.

Cleide: Vamos aprofundar esses temas em uma outra entrevista.

Einstein: Com muito prazer Frau Medeiros. Mas, vamos ver logo se essa nossa primeira entrevista vai ser publicada.

Ruiz: Herr Einstein, o senhor nos apresentou, brilhantemente, um elenco de quatro mistérios, todos eles relacionados com a interação da radiação eletromagnética com a matéria e nos presenteou com a informação preciosa de que o seu trabalho laureado com o prêmio Nobel envolveu a solução simultânea desses quatro problemas, solução esta que nasceu da hipótese da quantização geral da energia. Sem querer entrar já nos problemas da propagação da radiação, que o senhor bem disse, nos levam ao desenvolvimento da relatividade, ainda existia algum outro grande problema no final do século XIX de que a Física estivesse ocupada?

Einstein: Existia, por exemplo, a ferrenha disputa entre os atomistas e os energeticistas. Apesar de bem sucedida, em vários aspectos, a teoria atômica estava ainda longe de ser aceita como uma unanimidade. Faltavam evidências convincentes e argumentações mais poderosas. A mecânica estatística, filha da teoria atômica,

tinha muitos adversários, dentre eles nomes de peso, como Ostwald, Ernest Mach e mesmo o Planck. O Planck até bem próximo dos 1900 era ainda um ferrenho adversário da teoria atômica.

Auta: Meu Deus! Mas, afinal, quando é que essa situação mudou? A partir de quando a teoria atômica se impôs de forma paradigmática aos físicos? Quem foi o principal responsável por isso?

Einstein: Desculpe-me, Frau Stella, mas a senhora me faz perguntas realmente embaraçosas para a minha modéstia.

Jenner: O que o senhor quer dizer, com essa sua modesta argumentação, que foi também o senhor que deu conta desse problema?

Einstein: Isso mesmo, Herr Bastos, fui eu, novamente, com a graça de Deus. A minha tese de doutorado, juntamente com o meu trabalho sobre o movimento Browniano, foram como que uma lápide para os opositores da teoria atômica. Após aqueles meus dois trabalhos, também de 1905, a teoria atômica passou a ser definitivamente paradigmática como perguntou Frau Stella.

João: Mas, havia, também, o problema das raias espectrais. Graças à sua descoberta, no século XIX, desenvolveu-se a análise espectral e novos elementos químicos foram encontrados, mas ninguém sabia a razão de ser daquelas raias, de onde elas provinham. Certamente elas estavam relacionadas com a própria estrutura da matéria, mas não havia ainda uma teoria que desse conta das mesmas.

Ruiz: Mesmo se levando em conta que já se sabia descrever e calcular as frequências de parte daquelas raias com a fórmula empírica de Balmer e a fórmula mais geral de Rydberg. A solução para esse problema só veio muito depois, já em 1913, com os trabalhos do Bohr.

Camello: Mas qual a gênese do trabalho do Bohr? Eu sei que ele desenvolveu um modelo atômico semelhante ao modelo do tipo planetário de Rutherford, mas que tentava escapar da contradição da instabilidade eletromagnética daquele modelo.

Stanly: Como assim?

Nelson: É que o átomo de Ruther-

ford previa cargas orbitando em torno do núcleo, estando, portanto aceleradas. Assim, como uma consequência, pela teoria eletromagnética de Maxwell, elas deveriam emitir radiação e espiralarem em direção ao núcleo. Foi o Bohr que resolveu esse problema com a introdução do conceito de níveis estacionários de energia.

Auta: Mas quer dizer que finalmente alguém além de Herr Einstein resolveu algo realmente grandioso dentre os grandes mistérios da física clássica? A questão de mérito, para mim, entretanto, é saber em que o Bohr se fundamentou para contornar esse problema da instabilidade eletromagnética dos átomos.

Camello: Isso! De onde o Bohr tirou essa idéia?

Einstein: Perdoe-me, Frau Stella, mas o Bohr se baseou exatamente na minha concepção mais geral da quantização da energia. Ele a aplicou brilhantemente ao seu modelo atômico.

Auta: Meu Deus, quer dizer, que ainda quando não foi o senhor quem resolveu o problema diretamente...

João: Pois é, ele estava por detrás daquela nova explicação.

Stanly: Por favor, chega de falar do nascimento da teoria quântica. Vamos voltar ao outro grande mistério. O mistério da propagação da radiação eletromagnética.

Camello: E que levará, ao final para onde?

Jenner: Para a teoria da relatividade.

Auta: De quem?

Jenner: Do Einstein.

Auta: Essa eu já sabia.

Camello: Deixe eu me situar um pouco. O senhor falou de sete mistérios ao todo, não foi? Um deles era a questão da validade ou não da teoria atômica, quatro outros estavam ligados à interação da radiação eletromagnética com a matéria, certo?

Einstein: Certo! A radiação de corpo negro, a luminescência, os calores específicos atômicos e o efeito fotoelétrico.

Camello: Isso já dá um total de cinco mistérios. E tem mais o mistério das raias espectrais que o João falou e que o Bohr resolveu baseado em sua

idéia da quantização geral da energia. E está faltando, ainda, o tal mistério da propagação da luz, ok?

Einstein: Isso!

João: Traduzindo, Camello, dos sete mistérios que deram origem à física moderna, ele matou seis e deu a arma para o Bohr matar o sétimo.

Lula: Agora sou eu que digo: é mole ou quer mais?

Jobson: Pois bem, Herr Einstein, como é que esse mistério da propagação da luz começou? Não é ele sobre o qual está faltando o senhor falar e que levará à relatividade?

Einstein: Por favor, posso beber um pouco de água e descansar um pouquinho? O assunto que vem a seguir é muito longo e merece ser discutido com todo o carinho. Temos de falar do desenvolvimento da óptica, do eletromagnetismo, da construção e da desconstrução do conceito de éter, temos também de discutir direitinho a contribuição de cada um dos personagens envolvidos nessa história do éter, das suas propriedades exóticas, do mistério da aberração estelar, de como e porque o éter veio a ser tomado como um referencial absoluto. Há de se discutir os papéis de Maxwell, Hertz, Voigt, Fitzgerald, Lorentz, Larmor e Poincaré. Só assim, por contraste e por comparação, a minha contribuição poderá ser apreciada.

Alexandre: Desculpe, sem querer importunar, Herr Einstein, mas o senhor pretende falar também em Olinto De Pretto?

Einstein: Eu sei ao que você está se referindo. São aquelas acusações de plágio lançadas contra mim. Terei o maior prazer em discutir isso também.

Alexandre: Concordo com o senhor, há muita gente que só conquista os seus míseros quinze minutos de fama jogando lama em quem brilha, mas mesmo assim essa questão merece um esclarecimento.

Nelson: Eu acho que nós poderíamos interromper a entrevista por aqui e retomar depois com as origens da relatividade. Além disso, se a entrevista ficar muito longa vamos ter problemas de espaço na revista e o Carlão vai querer cortar algumas partes.

João: Podem deixar. Enquanto

isso, o velho fica hospedado na minha casa comendo carne de Sol com feijão verde, farofa, inhame e manteiga de garrafa. SE essa entrevista for publi-

cada, nós entrevistaremos o velho sobre os outros assuntos que o Alexandre falou.

Alexandre: Tudo bem, mas se o

Henrique acordar coloque ele de novo no skate. O importante é não deixar o Einstein ir embora.

Risos...

## Bibliografia

- K. Amano, *The Origin of the Theory of Thermal Radiation and Quantum Theory* (Dai Nippon Pub, Tokyo, 1943).
- A. Arons, *Development of Concepts of Physics* (Addison-Wesley Publishing Co., New York, 1965).
- J. Bernstein, *As Idéias de Einstein* (EDUSP, São Paulo, 1975).
- J. Bjorken, *The Future of the Quantum Theory*. Beam Line, Summer-Fall (2002).
- E. Braun, *Una Faceta Desconocida de Einstein* (Editora Fondo de Cultura Económica, México, 1986).
- H. Brown, *Einstein* (Editora Brasiliense, São Paulo, 1984).
- M. Bunge, *Vinte e Cinco Séculos de Física Quântica*. *Gazeta da Física* **25**:3, 4 (2002).
- J. Cardoso, *La Enseñanza de la Física a los Cien Anos de la Mecánica Cuántica*. *Revista Momento* **21**:Dezembro, 1 (2000).
- C. Cercignani, *Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms* (Oxford University Press, Oxford, 1998).
- A. Einstein, *Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light*. *American Journal of Physics* **33**:5 367 (1965). (tradução de Arnold Arons para o inglês do trabalho original de Einstein publicado na *Anallen der Physik* em 1905)
- A. Einstein, *Notas Autobiográficas* (Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1982).
- A. Einstein, *Como Vejo o Mundo* (Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1981).

- A. Einstein, *Escritos da Maturidade* (Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1996).
- L. Guimarães, *De Onde Vem o  $h$ ?* *Folhetim da Física* **4**:20, 2 (2005).
- J. Heilbron, *Dilemmas of an Upright Man: Max Planck and the Fortunes of German Science* (Harvard University Press, Cambridge, 2000).
- B. Hoffmann and H. Dukas, *Einstein* (Paladin Grafton Books, London, 1986).
- B. Hoffmann, *The Strange Story of Quantum Mechanics* (Dover Pub, New York, 1959).
- H. Kragh, *Max Planck: The Reluctant Revolutionary*. *Physics World*, December (2000).
- M. Lokajycek, *Quantum Theory of Microworld and the Reality*. Institute of Physics, Czech Republic, Prague, December (2004).
- Maffett Jr, I.L. *Einstein and "Jabberwocky": Through the Quantum Looking Glass* (Georgia, Georgia University Press, Athens, 1998).
- R. Martynez, *La Teoria de la Radiación del Cuerpo Negro*. *Revista Momento* **19**:Dezembro, 59 (1999).
- P. Michelmore, *Einstein: Perfil de um Homem* (ditorial Labor, Barcelona, E1968).
- E. Mozena, *A Solução de Planck para o Problema da Radiação do Corpo Negro e o Ensino da Física Quântica*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física e Faculdade de Educação. Universidade de São Paulo, 2003.
- V. Natarajan, V. Balakrishnan and N. Mukunda, *Einstein's Miraculous Year*. *Resonance*, **10**:3, 35 (2005).
- E. Nelson, *Dynamical Theories of Brownian Mo-*

- tion* (Princeton University Press, Princeton, 1967).
- H. Niedderer and J. Petri, *Relations between Teaching and Learning in a Quantum Atomic Physics Course*, in Proceedings of the ESERA Conference: Research in Science Education - Past, Present & Future (University of Kiel - Germany, 1999).
- D. Overbye, *Einstein Apaixonado* (Editora Globo, São Paulo, 2002).
- L. Peña, *Introducción a la Mecánica Cuántica* (Ediciones Científicas Universitarias, Fondo de Cultura Económica, México, 1990).
- M. Planck, *Eight Lectures on Theoretical Physics* (New York, Dover Publications, Incorporated, 1998).
- A. Schirrmacher, Hilbert and Quantum Physics, in Proceedings of the XXth International Congress of History of Science (Liege, 1997).
- E. Segré, *From X-Rays to Quarks* (W.H. Freeman & Co., New York, 1980).
- N. Studart, *A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck*. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22**, 523 (2000).
- K. Taber, *When the Analogy Breaks Down: Modelling the Atom on the Solar System*. *Physics Education* **36**, 222 (2001).
- D. Ter Haar, *The Old Quantum Theory* (Pergamon Press Ltd., Oxford, 1967).
- A. Venugopalan, *The Coming of a Classical World*. *Resonance* **9**:9, 10 (2004).
- G. Whitrow, *Einstein: The Man and his Achievement* (Dover Publications, New York, 1973).

**Ensino de Física: Reflexões**  
MEC - SBF

11 a 12 de Agosto de 2005  
Brasília

Ano Mundial da  
**FÍSICA**  
2005

- . Formação de professores
- . Educação a distância
- . Divulgação científica
- . Interdisciplinaridade

[www.sbfisica.org.br](http://www.sbfisica.org.br)

Ministério da Educação

SBF SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

BRASIL GOVERNO FEDERAL



**M**ais de quarenta livros (veja a relação no final do artigo) já foram publicados no Brasil tendo Albert Einstein como autor ou objeto central. Entre essas obras encontram-se:

- biografias;
- divulgação científica;
- compilação de textos atribuídos a Einstein;
- romances
- pelo menos um livro no estilo auto-ajuda (*Pense como Einstein*);
- um livro sobre ciência na cozinha, com receitas culinárias (*O que Einstein Disse a seu Cozinheiro*), que embora seja muito bom na sua categoria, não pode ser incluído em uma seleção de literatura sobre Einstein.

A presente seleção foi motivada pela grande quantidade de pedidos que o autor recebe para indicar livros sobre Einstein. Sendo natural que ninguém deva indicar livros de qualidade duvidosa, decidiu-se aqui fazer uma seleção que se pretende canônica, de modo que só serão incluídas obras que o autor sente-se à vontade para recomendar. Uma relação completa de resenhas do autor e de outros resenhistas encontra-se em [www.if.ufrgs.br/spin/amf/canone.htm](http://www.if.ufrgs.br/spin/amf/canone.htm).

Embora alguns livros possam ser enquadrados em mais de uma das categorias arbitrariamente definidas abaixo, eles serão mencionados apenas naquela que o autor considera a mais representativa.

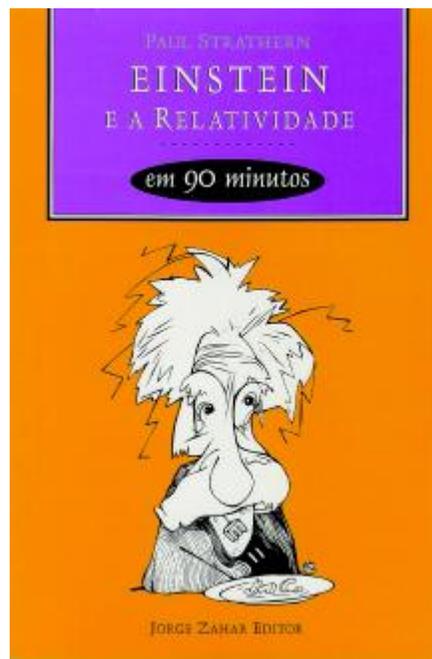
### Para a primeira leitura

Não há, no Brasil, livro que seja recomendado para o leitor absolutamente leigo em assuntos relacionados a Einstein, tanto do ponto de vista científico quanto histórico. O único que se aproxima dessa categoria é *Einstein e a Relatividade em 90 Minutos*, escrito por Paul Strathern. Trata-se de um pequeno livro de bolso, com 90 páginas, em estilo fluente e agradável. No entanto, para o leigo absoluto o texto apresenta questões quase incompreensíveis a partir da página 31, quando o autor diz "(...) devemos primeiro traçar a história científica da luz. Desde a época dos gregos antigos, filósofos e cientistas acreditavam que ela consistia em minúsculos grãos de matéria. (...) Em 1678, o astrônomo e físico holandês Christian Huygens sugeriu que a luz era de fato composta de ondas." Mais adiante, na página 32: "Na década de 1860, Maxwell calculou que tanto as forças elétricas quanto as magnéticas deviam movimentar-se através do espaço com velocidade próxima à da luz." Ultrapassados

**Não há, no Brasil, livro que seja recomendado para o leitor absolutamente leigo em assuntos relacionados a Einstein, tanto do ponto de vista científico quanto histórico. O único que se aproxima dessa categoria é *Einstein e a Relatividade em 90 Minutos*, de Paul Strathern**

esses pequenos obstáculos, o leigo vai ficar encantado com a leitura deste livro. A propósito, o autor deixou passar a oportunidade para discutir a polêmica entre Newton e Huygens sobre a natureza da luz. Polêmica que, no Século 20, desembocou na dualidade partícula-onda. Também não podemos deixar de comentar uma pequena

.....  
**Carlos Alberto dos Santos**  
 Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
 Editor do sítio [www.if.ufrgs.br/einstein](http://www.if.ufrgs.br/einstein)  
 Endereço atual: Pró-Reitoria de Ensino, Coordenação de Educação a Distância, UERGS  
 .....



Este artigo relaciona e comenta livros de e sobre Einstein, tendo como propósito servir de guia para os interessados na vida e obra de uma das mentes mais brilhantes do século 20.

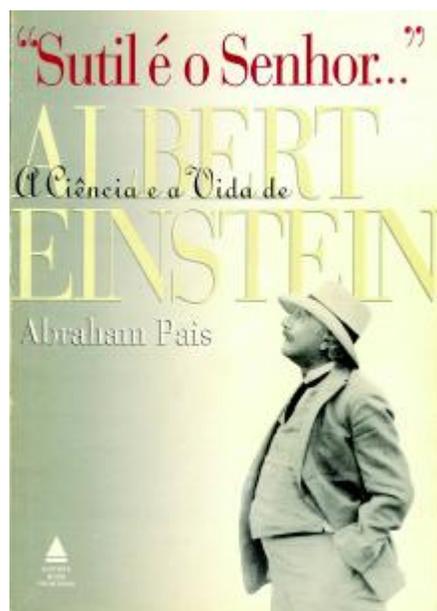
falha do autor, que deixou de mencionar a observação do eclipse solar de 1919 em Sobral. Mencionou apenas a ilha de Príncipe, no golfo da Guiné, na África portuguesa.

O prenome de Bohr aparece mais de uma vez grafado erradamente (talvez um erro tipográfico?): Nils, ao invés de Niels. Na verdade, o nome completo é Niels Henrik David Bohr.

## Biografias

Nessa categoria temos cinco excelentes indicações, cada uma tratando de um aspecto particular da vida de Einstein.

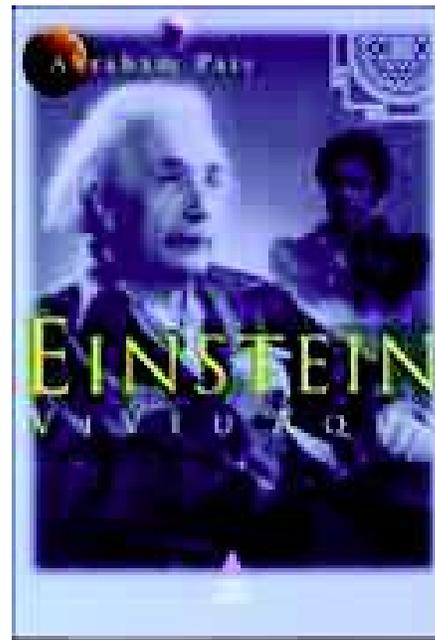
Importantes fatos científicos e pessoais são apresentados na magnífica obra de Abraham Pais, *Sutil é o Senhor...: A Ciência e a Vida de Albert Einstein*. Trata-se de um livro recomendável para a biblioteca de qualquer pessoa culta, e obrigatória na cabeceira de qualquer cientista. Entre todos os que escreveram sobre Einstein, Abraham Pais parece ser o mais qualificado. Físico teórico de reconhecida competência, professor emérito da Universidade Rockefeller, em Nova York, Pais conviveu com Einstein de 1946 a 1955. Todavia, apesar de inegável fonte bibliográfica, o livro apresenta um inconveniente para o leigo, que não entende e eventualmente não esteja interessado nas complicadas equações apresentadas ao longo das mais de 600 páginas. A propósito, há uma história que justifica a ressal-



va quanto à dificuldade de leitura para o leigo. Por volta de 1919, quando um jornalista pediu a Einstein uma descrição do seu trabalho que fosse acessível a mais de doze pessoas, “o doutor riu amigavelmente, mas insistiu na dificuldade de se fazer compreender por leigos”.

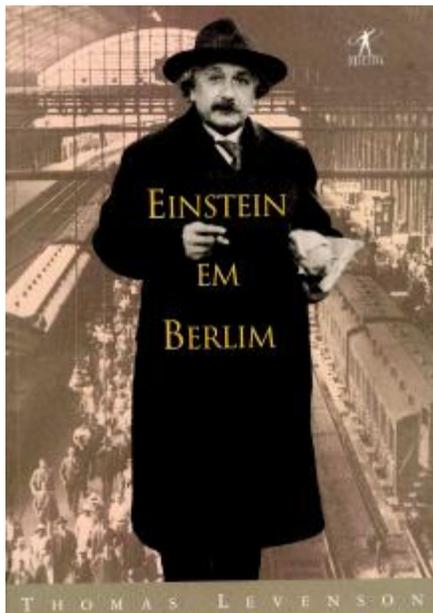
Em função do nível de dificuldade imposto pelo seu primeiro livro, Pais escreveu *Einstein Viveu Aqui*, no qual trata a obra científica de Einstein sob um enfoque qualitativo e mais acessível a todos os leitores. Além disso, Pais prioriza nesse novo livro a dimensão humana da vida de Einstein, sem desprezar o rigor da abordagem histórica. Resulta daí um texto fluente e agradabilíssimo, abordando questões polêmicas, como o suposto envolvimento de Einstein com a fabricação da bomba atômica americana. Mesmo para o leitor razoavelmente atualizado com a literatura pertinente à história da Física, Pais revela fatos esclarecedores. Por exemplo, no primeiro capítulo, há uma bela descrição da dramática vida conjugal de Albert e Mileva Maric, sua primeira mulher. Pais discute, detalhadamente, a suposta influência de Mileva no trabalho de Einstein, de modo particular na teoria da relatividade. Em duas páginas ele apresenta uma argumentação para concluir que tudo o que resta como evidência de um possível papel de Mileva no desenvolvimento da relatividade é o comentário de Einstein, numa carta de março de 1901: “Juntos concluiremos com êxito nosso trabalho sobre o movimento relativo”. Pais atribui essa afirmação ao estado emocional em que se encontrava Albert; um jovem de 22 anos, profundamente apaixonado, sem emprego e sem contato com cientistas da sua geração. Mileva era a única caixa de ressonância sempre disponível para as suas idéias. Em suma, a afirmação acima poderia ter o peso e a medida da gratidão.

Tanto em vida, como após sua morte, Einstein foi alvo de intensa curiosidade pública. Isso está bem registrado em três capítulos. Em *Amostras do die komische Mappe*, Pais nos apresenta inúmeras e pitorescas mensagens de estranhos, desde notas de



congratulações até pedidos de ajuda ou informações adicionais; de comentários inteligentes a declarações loucas; de expressões de ódio a ameaças. Não se sabe quantas dessas mensagens lhe foram enviadas, mas, não menos do que 600 sobreviveram. O alentado ensaio *Einstein e a Imprensa*, representa a primeira abordagem desse tipo na extensa bibliografia a respeito do cientista. Pais considera que Einstein, criador de uma parcela da melhor Ciência de todos os tempos, é em si próprio uma criação da mídia, no sentido de ser e permanecer uma figura pública.

Tanto em *Sutil é o Senhor...* quanto em *Einstein Viveu Aqui*, Pais tratou com pouca profundidade a vida do biografado em Berlim e, mesmo assim, de forma dispersa ao longo dos dois livros. Mas Einstein viveu em Berlim momentos extremos da sua vida! Da completa felicidade pelo desenvolvimento da relatividade geral e pela convivência em um ambiente científico de altíssimo nível intelectual, à dolorosa provação dos ataques antissemitas, com sérias possibilidades de assassinato. Entre um extremo e outro, registra-se o drama da sua vida conjugal. Na década de 1920 ele era o cientista mais festejado em qualquer lugar do mundo civilizado, como continua sendo até hoje. Não obstante, era submetido a enormes tensões emocionais. Tudo isso é relatado com



precisão e agradável estilo pelo documentarista Thomas Levenson, no seu maravilhoso livro *Einstein em Berlim*. Um exemplo dramático desse estado de tensão encontra-se no próprio diário de Einstein. No dia 6 de dezembro de 1931, a bordo de um navio a caminho da Califórnia, ele escreveu: “Resolvi hoje que renunciarei essencialmente à minha posição em Berlim e serei uma ave de arribação pelo resto da vida”. No entanto, protelou o quanto pôde esta decisão. Em dezembro de 1932, partiu da Alemanha para nunca mais voltar. Na despedida da casa de campo em Caputh, olhou para sua mulher e disse: “Olhe bem para nossa *villa*”. “Por que?”, perguntou Elsa. “Você nunca mais vai vê-la”. É impossível estimar a amargura daquelas palavras, conclui Levenson.

A ida da família Einstein para Berlim, em abril de 1914, marcou o colapso final do seu casamento com Mileva Maric. Levenson trata essa questão com muita profundidade e isenção. Apresenta fatos pouco conhecidos, como por exemplo, o trecho de uma carta que Einstein em 2 de dezembro de 1913, enviou para Elsa, sua prima, que viria a ser sua mulher pelo resto da vida: “Trato minha mulher como uma empregada que não posso demitir”. Como disse Levenson na página 37: “A atitude de Einstein em relação à esposa passou de um afeto aparentemente distante a uma atitude de frieza e surpreendente brutalidade”.

Além da extraordinária descrição do contexto político alemão nos anos que antecederam a Segunda Guerra Mundial, Levenson discute conceitos físicos com razoável precisão. Por exemplo, é maravilhosa a apresentação da idéia de simultaneidade. Todavia há pequenos equívocos, como quando trata do modelo de Bohr, na página 312. Também não apresenta referências para a colaboração entre Einstein e Wander Johannes de Haas, discutida na página 127. Trata-se de um estudo sobre magnetismo, cujos resultados Einstein publicou em dois trabalhos de 1915.

Há ainda um equívoco quando fala da viagem de Einstein à América do Sul, em 1925. Ao contrário do que ele diz, Elsa não acompanhou o marido nessa viagem. A menos desses pequenos deslizes, o livro de Levenson é maravilhoso, e pode ser colocado ao lado das melhores biografias de Einstein.

No conjunto, a literatura internacional trata bem as contribuições científicas e a vida privada de Einstein. No entanto, há uma lacuna muito especial para o nosso leitor. Refiro-me à viagem que ele fez à América do Sul. Ao meu conhecimento, entre as dezenas de biografias amplamente conhecidas, apenas três fazem referência a esta viagem. Em *Einstein Viveu Aqui* Abraham Pais dedica apenas um pequeno parágrafo. Em *Einstein em Berlim*, Thomas Levenson dá informações equivocadas sobre a viagem, e parece duvidoso que a “viagem era primordialmente de férias”.

Agora, com o livro de Alfredo Tiomno Tolmasquim, *Einstein, o Viajante da Relatividade na América do Sul*, ficamos sabendo que a coisa não foi assim tão simples. Em primeiro lugar, várias são as hipóteses para justificar a decisão de Einstein viajar à América do Sul. Uma delas refere-se à preocupação do físico em buscar um lugar seguro onde se refugiar dos ataques sofridos na Europa. Depois do assassinato do ministro Walter

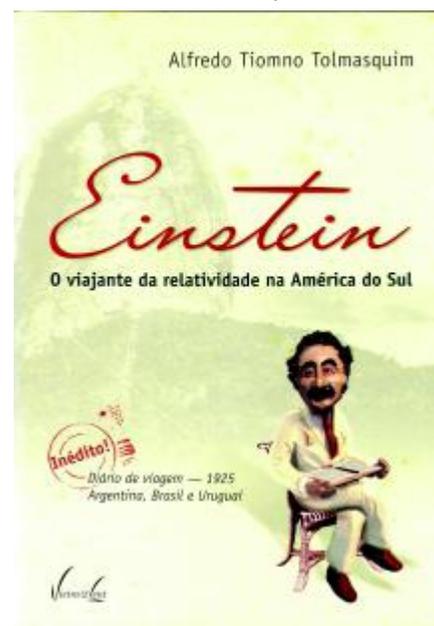
Rathenau em junho de 1922, temia-se que a vida de Einstein também estivesse em perigo. Outra hipótese é que ele estava fugindo da sua jovem secretária, Betty Neuman, com quem tivera um caso amoroso. Tolmasquim usa um argumento convincente para contestar esta hipótese: se fosse apenas para viajar, Einstein bem poderia ter aceito outros convites na mesma época, como aquele do importante físico americano Robert Millikan, para visitar a Califórnia. Como Einstein, Millikan também era Prêmio Nobel de Física, e talvez tenha sido com frustra-

ção que leu a resposta do eminente colega alemão: havia sido preterido em favor dos sul-americanos. Outro motivo importante teria sido seu envolvimento com o judaísmo. Aparentemente ele tinha interesse na integra-

ção das jovens comunidades judaicas da América do Sul com a proposta de criação da Universidade Hebraica, que seria inaugurada durante a sua viagem. Esse foi outro importante evento que ele abdicou em favor dos compromissos assumidos com os sul-americanos.

Mesmo que não fosse um belo livro, e o é, *Einstein, o Viajante da Relati-*

**No conjunto, a literatura internacional trata bem as contribuições científicas e a vida privada de Einstein. No entanto, há uma lacuna muito especial para o leitor brasileiro: entre as dezenas de biografias amplamente conhecidas, apenas três citam a viagem à América do Sul**

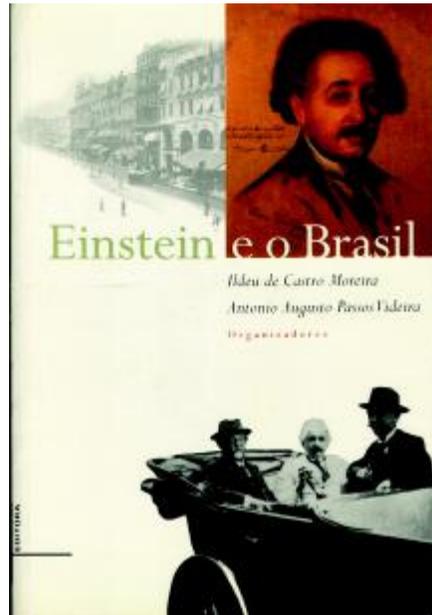


vidade na América do Sul teria posição destacada na literatura sobre Einstein. É a primeira vez que se publica integralmente o seu diário durante esta viagem. O diário revela um Einstein livre de qualquer limite psico-social, migrando da sincera admiração pela região e por alguns representantes do seu povo às mais ácidas e abjetas observações preconceituosas. Vejamos alguns exemplos. Há 80 anos, precisamente no dia 4 de maio de 1925, ele escrevia: “Chegada ao Rio ao pôr-do-sol e tempo fabuloso. Ilhas graníticas de formas fantásticas estão a pouca distância”. Ele vinha do Uruguai, onde passara uma semana depois de uma estada de 28 dias na Argentina. Longa viagem de navio, com início em 5 de março, no porto de Hamburgo, com uma rápida parada no Rio de Janeiro, no dia 21. Em 4 de maio estava de volta para permanecer uma semana na Cidade Maravilhosa. Na despedida demonstrava admiração pelo marechal Rondon: “Grande apresentação cinematográfica da vida dos índios e seu desenvolvimento exemplar através do general Rondon, um filantropo e líder de primeira ordem”, escrevia ele no dia 11. Em seguida indicaria Rondon para o Prêmio Nobel da Paz, honraria jamais concretizada.

Parece não ter gostado das suas companhias de viagem. Em 19 de março, escreve: “Na primeira classe os argentinos fizeram feio. Classe rica, esnobes e ainda por cima infantis”. Por outro lado, adorou o Uruguai (24 de abril): “No Uruguai encontrei uma autêntica cordialidade como raramente na minha vida”.

Já no Rio de Janeiro, em 6 de maio: “Sou um tipo de elefante branco para os outros, eles, para mim, tolos”. E no dia seguinte: “Almoço na casa do professor Castro. Verdadeiro tolo, mas companhias interessantes (...) Quando elogiam alguém, estão elogiando a eloquência. Acredito que essa tolice e irrelevância tenha a ver com o clima”.

O livro de Tolmasquim será um marco da literatura histórica brasileira, mas ele não foi o primeiro a tratar com detalhe a visita de Einstein ao país. Em 1995, a Editora da UFRJ publicou *Einstein e o Brasil* [edição es-



gotada], livro organizado por Ildeu C. Moreira e Antonio A. Videira. O mérito inquestionável de Tolmasquim foi trazer ao conhecimento público o diário de Einstein, um documento imprescindível para a compreensão de seus sentimentos frente às populações tropicais.

Sob o ponto de vista mais amplo e de interesse para o leitor comum, a visita de Einstein ao Brasil talvez seja melhor abordada em *Einstein e o Brasil*, que apresenta uma série de artigos interessantes, escritos por estudiosos importantes, incluindo o próprio Tolmasquim.

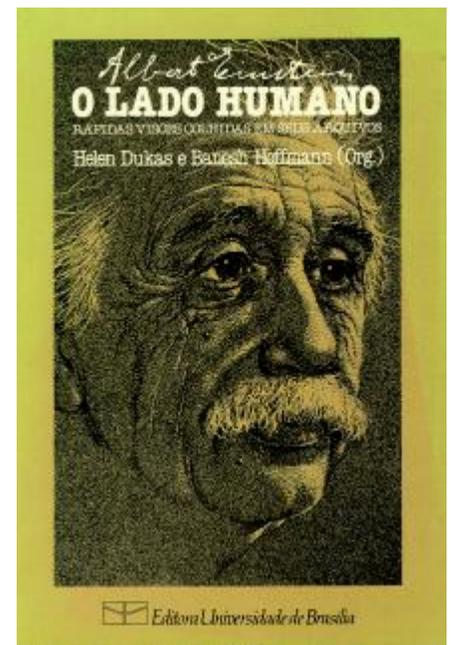
Para concluir esta seção, é de se lamentar apenas que a bela biografia escrita por Albrecht Fölsing (*Albert Einstein: A biography*. New York: Penguin, 1997) ainda não tenha despertado o interesse de qualquer editora brasileira.

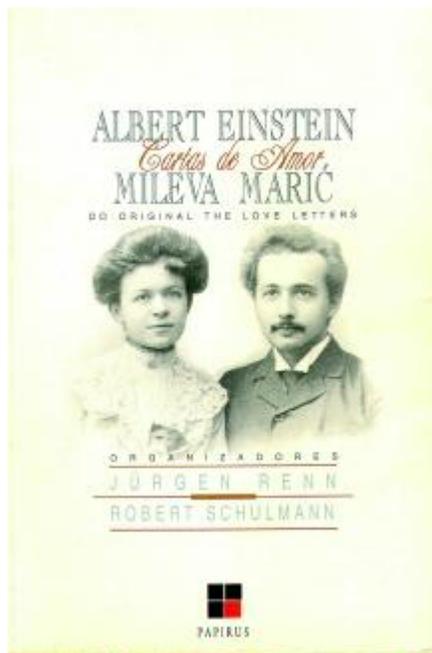
### Textos de Einstein

Editados no Brasil, existem pelo menos seis livros escritos por Einstein. Além desses, existem três editados por outros autores, com textos de Einstein. Não há como compará-los, pois são textos da mesma fonte, abordando assuntos diferentes. Tentarei aqui apenas informar do que tratam. Começamos pelos três últimos. Desses, o primeiro a ser editado no Brasil foi *Albert Einstein, o Lado Humano*, organizado por Helen Dukas e Banesh Hoffmann. Trata-se de um livro com

citações e histórias sobre Einstein, colecionadas por quem conviveu com ele. Helen Dukas foi sua secretária particular de 1928 até a morte do cientista. Banesh Hoffmann, ao lado de Leopold Infeld, foi colaborador de Einstein em dois artigos sobre a teoria da relatividade geral. Vários textos transcritos nos livros são apresentados na versão original, em alemão. Embora seja uma fonte histórica de grande valor, a organização do livro é confusa, coisa que os próprios organizadores não deixaram de perceber quando na apresentação escrevem: “(...) ele [o livro] representa uma viagem de turismo, aparentemente errática, cujo efeito cumulativo, esperamos, será um conhecimento mais profundo e mais rico do homem Einstein”.

Agora, em termos de organização cronológica e tratando de um tema tão específico como o jovem Einstein, o livro *Albert Einstein / Mileva Maric: Cartas de Amor* é imbatível. São 43 cartas de Einstein para Mileva e 11 delas para ele, escritas entre 1897 e 1903. Trata-se de um livro essencial para quem deseja conhecer o pensamento do jovem Einstein e sua arrebatadora paixão por Mileva Maric. Nas cartas de Einstein percebe-se claramente sua heurística em direção aos trabalhos que o tornaram a personalidade do Século 20. Alguns desses trabalhos, justamente aqueles que motivaram a





escolha de 2005 como o Ano Mundial da Física, estão no terceiro livro mencionado acima. Refiro-me a *O Ano Miraculoso de Einstein: Cinco Artigos que Mudaram a Face da Física*, obra organizada pelo historiador John Stachel. Além dos famosos artigos publicados por Einstein em 1905, o livro traz um belo prefácio de Roger Penrose e uma alentada introdução escrita por Stachel. Além disso, os artigos são acompanhados de interessantes notas editoriais.

Dos livros com autoria explícita de Einstein, o primeiro a ser publicado no Brasil foi *A Evolução da Física* [edição esgotada], escrito em co-autoria com Leopold Infeld. Além de uma bela obra de divulgação científica, a edição deste livro envolveu uma comovente história de solidariedade humana. Na década de 1930, o físico polonês Leopold Infeld emigrou para os EUA, fugindo da perseguição nazista. Einstein o acolheu, mas não foi capaz de lhe garantir uma bolsa de estudo. A solução encontrada para mantê-lo foi a edição deste livro.

Existem quatro livros nos quais Einstein discute aspectos da sua vida pessoal, emite opiniões sobre política, educação, ciência, religião, etc., tudo em um tom coloquial, sem qualquer sofisticação científica. Entre esses, *Notas Autobiográficas* talvez seja o mais relevante. Este livrinho de 88 páginas é uma obra indispensável na

biblioteca de quem deseja ter um breve mas significativo panorama da vida de Einstein. Único texto autobiográfico de Einstein, foi escrito em 1946 para atender o insistente pedido de Paul Arthur Schilpp, que em 1949 editou um livro em comemoração aos setenta anos do cientista (P.A. Schilpp (ed), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (The Library of Living Philosophers, Evanston, 1949)). O texto foi originalmente publicado nessa obra, mas em 1979 ele apareceu como um volume separado, para comemorar o centenário de nascimento de Einstein.

Em *Como Vejo o Mundo*, Einstein fala de tudo, mas o capítulo V, intitulado *Estudos Científicos*, é uma jóia em termos de divulgação científica. No capítulo I, Einstein demonstra toda sua admiração por Hendrik Antoon Lorentz, com quem ele muito aprendeu.

Os livros *Pensamento Político e Últimas Conclusões* e *Escritos da Maturidade* apresentam uma curiosidade: ambos têm a mesma origem, *Out of My Later Years*, publicado pela primeira vez em 1950. Em 1983 a editora Brasiliense publicou o *Pensamento...*, com seleção de textos e prefácio do ilustre físico Mário Schenberg. Em 1994, a editora Nova Fronteira publicou *Escritos da Maturidade*, a versão completa do texto original.

Finalmente, devo mencionar o livro cujo assunto é aquele a que o imaginário popular predominante associa a figura de Einstein: *A Teoria da Relatividade Especial e Geral*. Conheço este livro na versão inglesa, mas infelizmente não cheguei a ler a edição publicada no Brasil. Pelo que sabemos do texto original, não é um despropósito recomendar a versão nacional.

### História e divulgação científica para iniciados

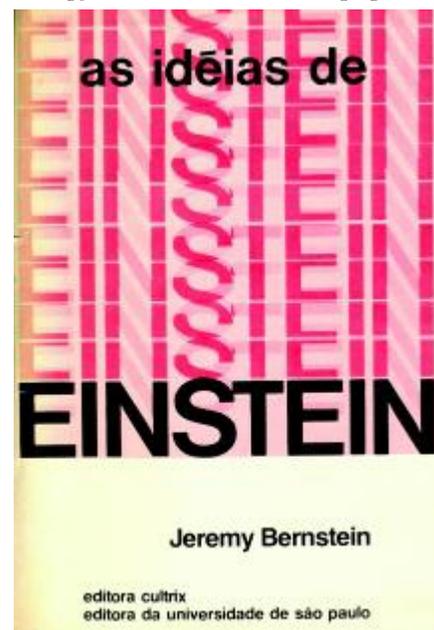
Um belo livro nesta categoria, mas que se encontra esgotado, é *As Idéias de Einstein*, de Jeremy Bernstein. Outra obra interessante é o livro de bolso *Albert Einstein*, de Harvey Brown. Em 105 páginas, Brown apresenta uma bela síntese da vida e da obra do pesquisador. Uma obra surpreendente é *O Universo Físico e Humano de Albert Einstein*, de Isaías

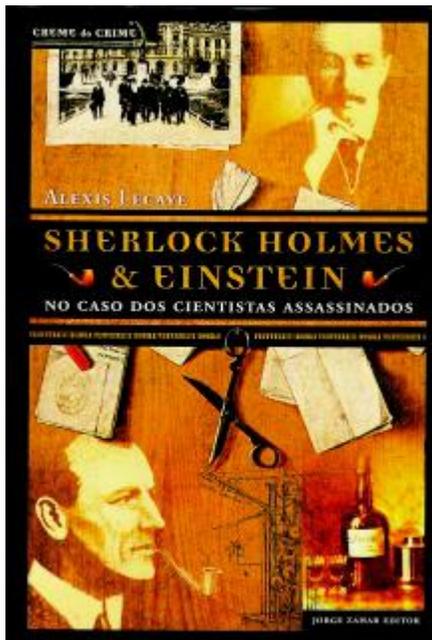
Golgher. O livro foi publicado pela Oficina de Livros, mas não se sabe o local e a data da publicação, pois não há ficha catalográfica na edição. Pela Bibliografia, a data de publicação deve ser posterior a 1989. Apesar desses inconvenientes editoriais, o texto é muito bom, e para quem dá importância a essas coincidências numéricas, o autor nasceu em 1905!

Finalmente, os dois mais recentes livros de divulgação científica em torno de Albert Einstein. O primeiro, *Einstein Estava Certo?* é uma obra-prima de popularização da teoria da relatividade geral. Seu autor, Clifford Will, entende muito bem do que fala, e o faz com estilo da melhor qualidade. É uma leitura obrigatória. Com um espectro mais abrangente, mas igualmente de qualidade, temos o livro de Cássio Leite Vieira, *Einstein o Reformulador do Universo*. Apresenta a estrutura de uma biografia, mas discute, com linguagem simples, os principais trabalhos de Einstein. Uma beleza de livro.

### Textos ficcionais

Ao meu conhecimento, existem apenas três obras ficcionais publicadas no Brasil, tendo Einstein como figura central. O primeiro, *Os Sonhos de Einstein*, é um livro de bolso que se tornou best-seller internacional. Escrito por Alan Lightman, professor de Física no MIT (Massachusetts Institute of Technology), este livrinho de 175 páginas é





uma maravilhosa “viagem” ao tempo e local em que Einstein vivenciou seu ano miraculoso. O autor empresta sua voz a Albert Einstein, e o livro, recheado de referências iconográficas, é como se fosse um diário para o ano de 1905. A

cada capítulo corresponde uma data, mas essas datas não têm qualquer correspondência com a cronologia que se conhece da vida de Einstein.

*Sherlock Holmes & Einstein no Caso dos Cientistas Assassinados*, de Alexis Lecaye, é escrito no melhor estilo dos romances policiais. Começa com um recorte de jornal, onde se noticia a morte de um homem dentro de uma garrafa com bicloreto de cálcio. Na seqüência, Holmes toma conhecimento de uma série de assassinatos envolvendo cientistas e o princípio do movimento perpétuo, todos ocorridos em Berna. Para desvendar o mistério, Holmes designa o dr. Watson, seu indefectível parceiro, para conhecer o terreno da tragédia. Logo depois, Holmes junta-se ao amigo e estabelecem uma disputa pela descoberta do mistério dos cientistas assassinados. Na

busca pela solução eles vão conhecer Mileva Maric, Michele Besso, o Escri-

tório de Patentes de Berna, a Acadêmica Olímpia, e, obviamente, Einstein.

Finalmente, o terceiro livro é da minha autoria, e não gostaria de comentá-lo aqui. Sugiro que o leitor consulte duas resenhas publicadas pelo professores Arden Zylbersztajn (*Física na Escola*, v. 5, n. 2, 37-38 (2004)) e Volnry Santos (*Voz do Paraná*, 24/6/2004, p. 11). Ambas encontram-se no endereço [www.if.ufrgs.br/spin/amf/plagio.htm](http://www.if.ufrgs.br/spin/amf/plagio.htm).

### Edição especial da revista *Ciência & Ambiente*

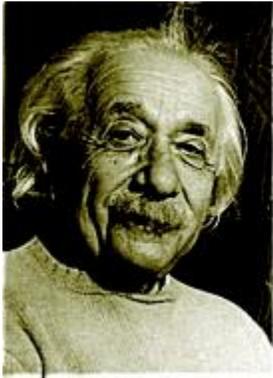
Este cânone não tinha como objetivo a indicação de edições especiais de revistas. Várias foram publicadas, algumas delas com excelentes matérias, mas esta edição de *Ciência & Ambiente*, publicada pela Universidade Federal de Santa Maria, tem

um caráter diferente. A qualidade do material obriga-nos a abrir esta exceção.

***Sherlock Holmes & Einstein no Caso dos Cientistas Assassinados*, de Alexis Lecaye, é escrito no melhor estilo dos romances policiais**

## Bibliografia de e sobre Einstein, publicada no Brasil

- M. Avalon, *Einstein, Por Ele Mesmo* (Martin Claret, São Paulo, 1992).
- J. Bernstein, *As Idéias de Einstein* (Cultrix/EDUSP, São Paulo, 1975).
- D. Bodanis, *E = mc<sup>2</sup>. Uma Biografia da Equação que Mudou o Mundo e o que ela Significa* (Ediouro, Rio de Janeiro, 2001).
- D. Brian, *Einstein. A ciência da Vida* (Ática, São Paulo, 1998).
- J. Brockman, *Einstein, Gertrude Stein, Wittgenstein e Frankenstein: Reinventando o Universo* (Companhia das Letras, São Paulo, 1988).
- H.R. Brown, *Albert Einstein* (Brasiliense, São Paulo, 1984).
- A. Calaprice, *Assim Falou Einstein* (Civilização Brasileira, Rio de Janeiro, 1998).
- N. Calder, *O Universo de Einstein* (Editora da UNB, Brasília).
- M. Claret, (coord. editorial). *O Pensamento Vivo de Einstein* (Martin Claret, São Paulo, 1984).
- C.A. Dos Santos, *O Plágio de Einstein* (WS, Porto Alegre, 2003).
- H. Dukas, e B. Hoffmann, *Albert Einstein, o Lado Humano* (Editora da UNB, Brasília, 1979).
- A. Einstein, e L. Infeld, *A Evolução da Física* (Zahar, Rio de Janeiro, 1966).
- A. Einstein, *Como Vejo o Mundo* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1981).
- A. Einstein, *Notas Autobiográficas* Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1982).
- A. Einstein, *Pensamento Político e Últimas Conclusões*, seleção de Mário Schenberg São Paulo, Brasiliense, 1983).
- A. Einstein, *Escritos da Maturidade* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1994).
- A. Einstein, *A Teoria da Relatividade Especial e Geral* (Contraponto, São Paulo, 1999).
- M.B. Freeman, *Albert Einstein* (Difusão Pan Americana do Livro, 1964).
- H.G. Garbedian, *A vida de Einstein* (José Olympio, Rio de Janeiro, 1959).
- I. Golgher, *O Universo Físico e Humano de Albert Einstein* (editado pela Oficina de Livros. Não há ficha catalográfica. Não se sabe o local da publicação. Pela Bibliografia, a data de publicação deve ser posterior a 1989).
- M. Jammer, *Einstein e a Religião* (Contraponto, São Paulo, 2000).
- A. Lecaye, *Sherlock Holmes & Einstein: O Caso dos Cientistas Assassinados* (Zahar, Rio de Janeiro, 2004).
- T. Levenson, *Einstein em Berlim* (Objetiva, Rio de Janeiro, 2003).
- A. Lightman, *Sonhos de Einstein* (Companhia das Letras, São Paulo, 1993).
- F. Macdonald, *Albert Einstein* (Globo, São Paulo, 1993).
- I. Monteiro, *Einstein, Reflexões Filosóficas* (Martin Claret, São Paulo, 1988), 3ed.
- I.C. Moreira, e A.A.P. Videira, orgs., *Einstein e o Brasil* (Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 1995).
- D. Overbye, *Einstein Apaixonado. Um Romance Científico* (Globo, São Paulo, 2002).
- A. Pais, *Sutil é o Senhor... A Ciência e a Vida de Albert Einstein* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995).
- A. Pais, *Einstein Viveu Aqui* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1997).
- C. Phillips, *O Livro Completo sobre Einstein* (Cidade, Madras, 2004).
- J. Renn, e R. Schulmann, orgs., *Albert Einstein / Mileva Maric: Cartas de Amor* (Papyrus, Campinas, 1992).
- H. Rohden, *Einstein, o Enigma do Universo* (Martin Claret, São Paulo, 2004).
- B. Russel, *ABC da Relatividade* (Zahar, Rio de Janeiro, 1966).
- J. Stachel, org., *O Ano Miraculoso de Einstein: Cinco Artigos que Mudaram a Face da Física* (Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 2001).
- F. Stern, *O Mundo Alemão de Einstein* (Companhia das Letras, São Paulo, 2004).
- P. Strathern, *Einstein e a Relatividade em 90 Minutos* (Zahar, Rio de Janeiro, 1998).
- S. Thorpe, *Pense como Einstein* (Cultix, São Paulo, 2003).
- A.T. Tolmasquim, *Einstein. O Viajante da Relatividade na América do Sul* (Vieria & Lent, Rio de Janeiro, 2003).
- C.L. Vieira, *Einstein, o Reformulador do Universo* (Odysseus, Rio de Janeiro, 2003).
- C.M. Will, *Einstein Estava Certo?* (Editora da UNB, Brasília, 1996).
- R.L. Wolke, *O que Einstein disse a seu Cozinheiro* (Zahar, Rio de Janeiro, 2003).



## Einstein: Uma Breve Cronologia

forma original, é introduzida em um artigo curto “A inércia de um corpo depende de seu conteúdo energético?” (publicado em 21 de novembro).

1906 – Recebe formalmente o título de doutor da Universidade de Zurique.

1907 – Introduz a teoria quântica na física do estado sólido. Publica seu primeiro artigo de revisão e especula sobre uma possível extensão da teoria da relatividade para sistemas acelerados.

1908 – Torna-se *Privatdozent* (docente remunerado por aulas dadas) na Universidade de Berna.

1909 – É designado Professor Extraordinário de Física Teórica na Universidade de Zurique e se demite do escritório de patentes e da Universidade de Berna. Recebe o título de doutor “honoris causa” da Universidade de Genebra. Participa de importante conferência em Salzburgo onde sugere o conceito de dualidade onda-partícula para a radiação.

1910 – Nasce seu segundo filho Eduard. Termina seu mais importante trabalho em mecânica estatística clássica: “Sobre opalescência crítica e a cor azul do céu”.

1911 – Em abril assume o cargo de diretor do Instituto de Física Teórica na Universidade Alemã de Praga e pede demissão da Universidade de Zurique. Em outubro participa do primeiro Congresso Solvay em Bruxelas.

1912 – Troca cartas amorosas com sua prima divorciada Elsa Lowenthal e a relação com Mileva começa a se deteriorar. Demite-se de sua posição em Praga e torna-se Professor de Física Teórica da ETH.

1913 – Em novembro é eleito para a Academia Prussiana de Ciências. É convidado para ser diretor do recém-fundado Instituto de Física Kaiser Wilhelm e para assumir uma cátedra de pesquisa, sem obrigação de dar aulas, na Universidade de Berlim, onde Elsa morava.

1914 – Em abril, chega em Berlim. Mileva vem depois com os filhos, mas logo retorna a Zurique porque alega não gostar de Berlim.

1915 – Assina sua primeira declaração pública, o “Manifesto aos Europeus”, em prol de uma cultura européia. Em novembro termina seu

1879 – Em 14 de março nasce Albert Einstein em Ulm, Alemanha na casa dos pais Hermann e Pauline Koch.

1880 – A família muda-se para Munique.

1881 – Nasce sua irmã Maja.

1884 – Ganha uma bússola de seu pai que lhe causou profunda impressão.

1885 – Ingressa na escola primária católica (Petersschule). Interessa-se pela religião judaica a partir de ensinamentos de um tio. Tem aulas de violino.

1888 – Frequenta a escola secundária (Luitpold-Gymnasium) em Munique.

1894 – A família muda-se para a Itália, mas Albert permanece em Munique. No final do ano abandona o Gymnasium e se reúne à família.

1895 – Não consegue admissão precoce no Instituto Politécnico Federal (ETH) em Zurique, apesar do bom desempenho em matemática e ciências. O diretor sugere que antes conclua a escola secundária. Frequenta a escola de Aarau morando na casa de um dos seus professores.

1896 – Renuncia à cidadania alemã porque detestava a mentalidade militarista alemã. Conclui o ensino médio em Aarau e no final de outubro ingressa na ETH.

1900 – Conclui o curso, mas não é escolhido como assistente na ETH.

1901 – Torna-se cidadão suíço. Procura emprego. Trabalha como professor substituto numa escola técnica em Winterthur e como tutor numa escola particular em Schaffhausen. Mantém relacionamento amoroso com Mileva Maric, uma colega da ETH. Seu primeiro artigo científico é publicado na prestigiosa revista *Annalen der*

*Physik*. Submete à Universidade de Zurique uma tese de doutorado sobre forças moleculares em gases.

1902 – Nasce sua filha Lieserl. Retira sua tese de doutorado e inicia trabalho provisório como perito técnico no escritório de patentes em Berna,

1903 – Casa-se com Mileva em Berna onde fixam residência. Não existe menção a Lieserl depois que contrai escarlatina. Parece que Einstein nunca viu a filha.

1904 – Nasce seu filho Hans Albert em Berna. Seu emprego torna-se permanente.

1905 – *Annus mirabilis* de Einstein. Em 30 de abril submete para publicação sua tese de doutoramento “Uma nova determinação das dimensões moleculares”. Em seguida, publica três de seus mais significativos trabalhos científicos: “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz” (publicado em 9 de junho) em que propõe o conceito do quantum de luz sugerindo que a radiação eletromagnética interage com a matéria como se possuísse uma estrutura granular (o efeito foto-elétrico); “Sobre o movimento de pequenas partículas em suspensão dentro de líquidos em repouso como exigido pela teoria cinético-molecular do calor” (publicado em 18 de julho), seu trabalho sobre o movimento browniano que provocou a realização de experimentos comprovando a validade da teoria cinética do calor e a consolidação da hipótese atomística da matéria; e “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento” (publicado em 26 de setembro), seu trabalho seminal sobre a teoria da relatividade especial. A famosa equação  $E = mc^2$ , em sua

trabalho sobre a estrutura lógica da teoria da relatividade geral.

1916 – O artigo “As origens da teoria geral da relatividade” é publicado no *Annalen der Physik*. Em maio é escolhido Presidente da Sociedade Alemã de Física. Finaliza seu livro de divulgação científica *A Teoria da Relatividade Especial e Relatividade Geral*. Publica três artigos sobre teoria quântica.

1917 – Escreve, em fevereiro, seu primeiro artigo sobre cosmologia. Fica prostrado com icterícia e úlcera e Elza cuida dele. Em outubro assume a direção do Instituto de Física Kaiser Wilhelm. Depois da 1ª Guerra Mundial mantém cidadania dupla: suíça e alemã.

1919 – Divorcia-se de Mileva em fevereiro, concordando com a cláusula que destinava qualquer dinheiro advindo de futuro prêmio Nobel para a manutenção dos filhos. Em 29 de maio, durante o eclipse solar, em Sobral e na ilha de Príncipe, expedições britânicas confirmam a deflexão da luz pelo Sol conforme previsto pela teoria da relatividade geral. Em 6 de novembro, os resultados são apresentados por Arthur Eddington na reunião conjunta da Royal Society e Royal Astronomical Society. A notícia corre o mundo e Einstein torna-se uma figura pública. Contrai matrimônio em 2 de junho com Elza que tem duas filhas solteiras Ilse (22 anos) e Margot (20 anos). Inicia seu interesse pelo sionismo.

1920 – Aparecem as primeiras manifestações de anti-semitismo e contra a teoria da relatividade entre os alemães, mas Einstein ainda permanece leal a Alemanha. Começa a se envolver em assuntos não científicos.

1921 – Em abril e maio realiza sua primeira viagem aos Estados Unidos. Recebe títulos honorários e faz quatro palestras em Princeton que se transformam no livro *The Meaning of Relativity*. Ajuda a levantar fundos para a criação da Universidade Hebraica de Jerusalém.

1922 – Termina seu primeiro trabalho sobre uma teoria de campo unificado. De outubro a dezembro, viaja ao Japão, com outras escalas no Oriente. Em Xangai, recebe a notícia de

que ganhara o prêmio Nobel de 1921 por seu trabalho sobre o efeito foto-elétrico.

1923 – Visita a Palestina e Espanha.

1924 – A enteada Ilse casa com o jornalista Rudolf Kayser, que veio a ser o primeiro biógrafo de Einstein. Há indícios de que Einstein, por certo tempo, esteve apaixonado por ela, antes de ter se casado com a mãe.

1925 – De março a maio viaja para a América do Sul, com visitas à Argentina, Uruguai e Brasil. Em solidariedade a Ghandi, assina um manifesto contra o serviço militar obrigatório. Torna-se um pacifista fervoroso. Até 1928 participa do Conselho Curador da Universidade Hebraica.

1926 – Ganha a medalha de ouro da Royal Astronomical Society da Grã-Bretanha.

1928 – Tem problemas cardíacos e permanece acamado por um ano. Helen Dukas torna-se sua secretária e governanta pelo resto da vida.

1929 – Inicia amizade duradoura com a Rainha Elizabeth da Bélgica. Em junho recebe a Medalha Planck.

1930 – Assina o manifesto em prol do desarmamento mundial. Em dezembro visita Nova York e Cuba e permanece até março de 1931 no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech) em Pasadena.

1931 – Profere palestras em Oxford e recebe título honorífico. Passa uma temporada de vários meses em sua casa de campo de Caputh, perto de Berlim.

1932 – De janeiro a março visita o Caltech. Volta a Berlim e em dezembro retorna aos Estados Unidos.

1933 – Em Janeiro, os nazistas assumem o poder. Desliga-se da Academia Prussiana de Ciências, renuncia à cidadania alemã e nunca mais retorna à Alemanha. Dos EUA, vai para a Bélgica, visita Oxford para proferir palestras. Em setembro, deixa definitivamente a Europa com Elsa e Helen Dukas e chega em Nova York em 17 de outubro. Publica, com Sigmund Freud, *Por que Guerra?* e assume a cátedra no Instituto de Estudos Avançados de Princeton.

1935 – No outono, muda-se para a casa na rua Mercer 112, Princeton,

onde Einstein, Elsa, Margot, Maja, e Helen Dukas viverão até a morte. Recebe a medalha Franklin.

1936 – Hans Albert conclui o doutorado em ciências técnicas na ETH (em 1947 torna-se professor em Berkeley). Em dezembro, Elza falece.

1938 – Publica com Leopold Infeld seu segundo livro de divulgação *Evolução da Física* que se torna um best seller.

1939 – Em agosto, assina a famosa carta ao Presidente Roosevelt acerca das implicações militares da energia atômica.

1940 – Torna-se cidadão americano.

1943 – Torna-se consultor do Escritório Naval de Artilharia dos EUA.

1944 – Uma cópia do manuscrito re-escrito do artigo original de 1905 sobre a teoria especial da relatividade é leilada por 6 milhões de dólares como contribuição ao esforço de guerra.

1945 – Aposenta-se oficialmente do Instituto de Estudos Avançados, recebe uma pensão, mas mantém uma sala de trabalho até sua morte.

1946 – Einstein torna-se Presidente do Comitê Provisório dos Cientistas Atômicos. Conclama as Nações Unidas a formar um governo mundial, declarando que seria a única maneira de manter a paz mundial.

1948 – Em agosto, Mileva morre em Zurique. Médicos de Einstein descobrem um grande aneurisma na aorta abdominal.

1950 – Em março escreve seu último testamento.

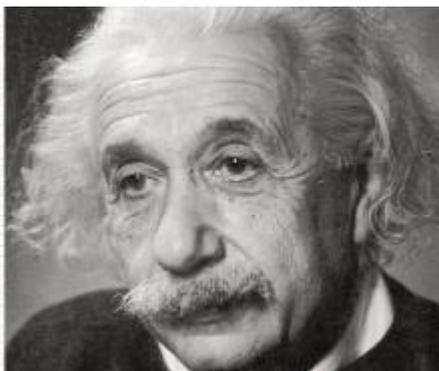
1952 – Declina o convite para ser Presidente de Israel.

1955 – Em 11 de abril, escreve sua última carta para Bertrand Russel concordando em assinar um manifesto conclamando as nações a renunciar ao uso de armas nucleares. Na madrugada de 18 de abril, Einstein morre devido à ruptura do aneurisma.

Nelson Studart  
DF/UFSCar

Baseado em Excertos de *The Expanded Quotable Einstein*, editado por Alice Calaprice, Princeton U.P., Princeton, (2000) e *Sutil é o Senhor... A Ciência e a Vida de Albert Einstein*, A. Pais, Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995.

## Citações de Einstein



*Aprender fatos não é muito importante para uma pessoa. Para isto ela realmente não precisa de universidade. Pode aprendê-los nos livros. O valor da educação em uma universidade [liberal arts college] não é a aprendizagem de fatos, mas o treinamento da mente para pensar em algo que não pode ser aprendido nos livros-texto* (1921, Sobre a opinião de Thomas Edison de que a educação universitária é inútil. Calaprice, p. 67).

*O objetivo [da educação] deve ser treinar indivíduos capazes de ação e pensamento independentes, que, no entanto, encarem o serviço à comunidade como sua maior realização de vida* (Discurso na convenção da Universidade Estadual de Nova York. Em 15/10/1936. Calaprice, p. 69. Transcrito no artigo *Sobre Educação em Escritos da Maturidade*, p. 40, Nova Fronteira, 1994).

*A meu ver, a pior coisa para uma escola é trabalhar com métodos de medo, força e autoridade artificial. Esse tratamento destrói os sentimentos saudáveis, a sinceridade e a autoconfiança do aluno* (Ibid. p. 69).

*Muitos professores perdem tempo formulando perguntas com o objetivo de descobrir o que o estudante não sabe, enquanto que a verda-*

*deira arte de inquirir consiste em descobrir o que o estudante sabe ou aquilo que é capaz de entender* (1920, Calaprice, p. 67).

*Educação é o que sobra, depois que se esquece tudo que se aprendeu na escola* (Esta citação não é primazia de Einstein, mas ele concordou com ela, pois aparece no artigo *Sobre Educação* citado acima).

*A coisa importante é não parar de questionar. A curiosidade tem suas próprias razões para existir. Não adianta ficar espantado quando contemplamos os mistérios da eternidade, da vida, da maravilhosa estrutura da realidade. É suficiente tentar todo dia apenas compreender um pouco deste mistério* (revista Life de 2/5/1955, Calaprice, p. 281).

*Não tenho nenhum talento especial. Sou apenas apaixonadamente curioso* (Para Carl Seelig, 11/03/1952).

*Todas as grandes realizações da ciência devem começar no conhecimento intuitivo, a saber, em axiomas, a partir dos quais as deduções são então feitas... Intuição é a condição necessária para a descoberta de tais axiomas* (1920, Calaprice, p. 180).

*Quando penso nos estudantes mais habilidosos que encontrei na minha docência – menciono aqueles que se sobressaíam não somente pela habilidade, mas pela independência de pensamento – então devo confessar que todos possuíam um vívido interesse em epistemologia. Ninguém pode negar que epistemólogos pavimentaram a estrada para o progresso [na direção da teoria da relatividade]; Pelo menos Hume e Mach, tanto*

*direta quanto indiretamente, ajudaram-me de modo considerável* (1916, Artigo Ernst Mach Calaprice, p. 283).

*Já há dois meses vagueio nesse hemisfério [sul] como um viajante da relatividade. Aqui é um verdadeiro paraíso e uma alegre mistura de povos* (A Paul Ehrenfest, Rio, 5/5/1925. Tolmasquim, p. 131).

*Não sou sionista no sentido de acreditar que aquilo resolva o problema judaico. Simpatizo com a obra que realizam os partidários desse ideal e contribuo para ela porque creio na necessidade de formar um centro moral que possa unificar a todos os judeus e donde seja factível irradiar a cultura judaica. Esta última é a função da Universidade de Jerusalém, que se inaugura em breve* (Mundo Israelita, 20/3/1925, Buenos Aires. Tolmasquim, p. 94).

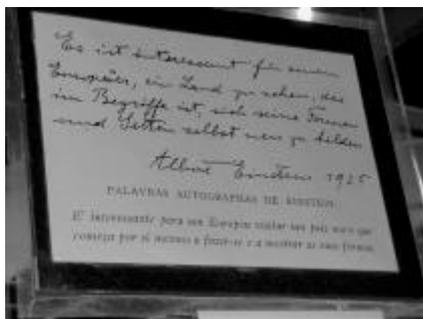
*A pergunta que minha mente formulou foi respondida pelo ensolarado céu do Brasil* (Um gesto de gentileza num pedaço de papel. Rio, 21/3/1925. Tolmasquim, p. 73).

*Jardim Botânico, bem como flora de modo geral, supera os sonhos das 1.001 noites. Tudo vive e cresce a olhos vistos por assim dizer. Deliciosa é a mistura étnica nas ruas. Português-índio-negro com todos os cruzamentos. Espontâneos como plantas, subjugados pelo calor. Experiência fantástica. Uma indescritível abundância de impressões em poucas horas* (Diário de bordo, Rio 22/3/1925. Tolmasquim, p. 77).

*(...) À tarde, Academia de Ciências. Sujeitos são oradores veementes. Quando elogiam alguém, estão elogiando a eloquência. Acredito que esta tolice e irrelevância tenham a ver com o clima. As pessoas acreditam que não* (Diário de bordo, Rio 7/5/1925. Tolmasquim, p. 197).

Nelson Studart  
DF/UFSCar

Excertos de *The Expanded Quotable Einstein*, editado por Alice Calaprice, Princeton U.P., Princeton, (2000) e *Einstein – o Viajante da Relatividade na América do Sul*, por Alfredo Tioimno Tolmasquim, Vieira & Lent, Rio de Janeiro (2003).



Quadro do Museu do Eclipse, Sobral, Ce.