



# **Ano miraculoso de Einstein**

*Cem anos da publicação dos artigos que mudaram a física*

**2005 foi escolhido pela União Internacional de Física Pura e Aplicada** como o Ano Mundial da Física – decisão, aliás, sancionada pela Organização das Nações Unidas a pedido do representante brasileiro nesse organismo.

A razão foi celebrar os 100 anos dos trabalhos feitos por Albert Einstein em 1905. Naquele ano, ele ajudou a mostrar, por exemplo, que a matéria é formada por átomos, que massa e energia são grandezas equivalentes – por meio de sua famosa fórmula  $E = mc^2$  – e que a luz tem uma constituição corpuscular.

Tantos trabalhos importantes e revolucionários em um só ano merecem, sem dúvida, ser lembrados sempre. Assim, aproveitamos este neste capítulo para falar um pouco desses trabalhos que mudaram tão profundamente nossa visão do macro e microuniverso e da vida de Einstein, certamente um dos maiores cientistas de todos os tempos.

- 16. | **A EFEMÉRIDE** | BERÇO, LIVRO E CHARUTO | ANO MIRACULOSO
- 17. | **O EFEITO FOTOELÉTRICO** | ELÉTRONS QUE SALTAM  
| PARTÍCULAS DE LUZ | IDÉIA MAIS REVOLUCIONÁRIA
- 19. | **A TESE** | O MAIS OBSCURO | AÇÚCAR COM ÁGUA | O MAIS CITADO
- 20. | **O MOVIMENTO BROWNIANO** | ZIGUEZAGUE ERRÁTICO  
| ATRAVÉS DE UM MICROSCÓPIO | REALIDADE DE ÁTOMOS E MOLÉCULAS
- 22. | **A RELATIVIDADE** | ASSOMBRADOS PELO ÉTER | DOIS POSTULADOS  
| REVISÃO RADICAL |  $E=MC^2$  | RESTRITA
- 24. | **A VIDA** | A INFÂNCIA | A JUVENTUDE | EM BERNA | EM BERLIM  
| EM PRINCETON
- 27. | **O CONTEXTO** | CRIATIVIDADE E CAMINHOS | FAMA MUNDIAL
- 28. | **EINSTEIN HOJE** | LASER E ÁTOMO GIGANTE | BURACOS NEGROS  
E ONDAS GRAVITACIONAIS | DIMENSÕES EXTRAS | NO MUNDO NANO

# A EFEMÉRIDE

## BERÇO, LIVRO E CHARUTO

Rua Kramgasse, 49, Berna, Suíça, 1905. No segundo andar, fica um apartamento modestamente decorado, reflexo do baixo poder aquisitivo de seus moradores. Um varal com roupas úmidas corta a sala. O inquilino, um técnico de 3ª classe do escritório de patentes da cidade, embala com uma mão o berço de seu filho e com a outra empunha um livro aberto. Na boca, um charuto de péssima qualidade, cuja fumaça se junta à fuligem que verte do fogão.

## ANO MIRACULOSO

Certamente, um ambiente pouco propício à prática da ciência. Mas foi nele, há cem anos, que um jovem de 26 anos produziu – nas horas vagas e isolado da comunidade científica – cinco artigos e uma tese de doutorado. Todos trabalhos de altíssimo nível. Eles mudariam para sempre a face da

física. Seu nome: Albert Einstein. Seu feito fez com que 1905 ficasse conhecido como Ano Miraculoso (*Annus Mirabilis*).

FOTO: LUCIEN CHAVAN



Torre do relógio de Berna.

# O EFEITO FOTOELÉTRICO

## ELÉTRONS QUE SALTAM

Naquele início de século, o chamado efeito fotoelétrico – no qual a luz (radiação eletromagnética) arranca elétrons de certos metais – ainda intrigava os físicos. Abaixo de certa frequência da luz incidente, por maior que fosse a intensidade luminosa, elétrons não conseguiam escapar do metal. Quando se aumentava a intensidade da radiação, esperava-se, como previa a teoria, que elétrons mais energéticos saltassem. Porém, notava-se apenas um aumento na quantidade de partículas ejetadas, todas dotadas da mesma energia. Ao se aumentar a frequência da luz incidente – indo da luz visível para o ultravioleta, por exemplo –, os elétrons também se tornavam mais energéticos. A explicação para isso tudo escapava à física da época.

## PARTÍCULAS DE LUZ

Tentativas teóricas já haviam sido feitas para solucionar a disparidade entre teoria e experimento. Mas foi o artigo “Sobre um ponto de vista heurístico relativo à produção e à transformação da luz”, de 17 de março – portanto, o primeiro concluído naquele ano – que resolveu o problema. Nele, Einstein adotou uma hipótese aparentemente simples: a luz é formada por partículas (os quanta de luz, que passaram, em 1926, a ser chamados fótons). A energia da radiação vem, portanto, em pacotes (fótons). Com isso, o efeito fotoelétrico ganhou uma explicação que podia ser testada experimentalmente: aumentar a intensidade da luz significa apenas aumentar o número de

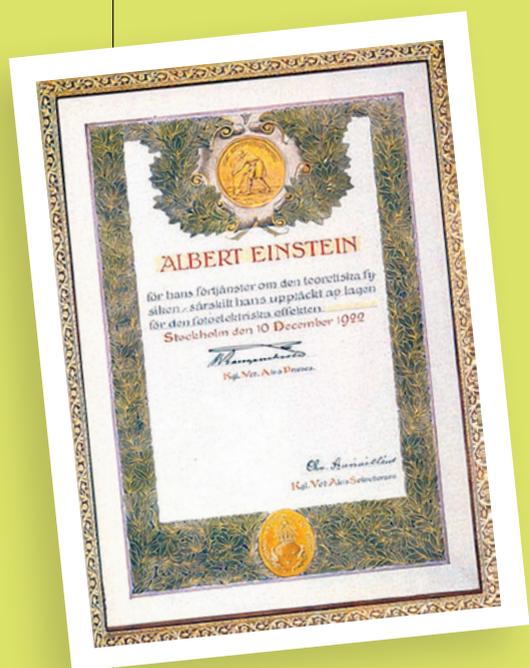
fótons de mesma energia que incidem sobre o metal. Aumentar a frequência da luz torna os fótons mais energéticos, pois sua energia, pela proposta de Einstein, é proporcional à frequência – e isso faz com que os elétrons ganhem mais energia nas colisões com os fótons que os ejetam.

### IDÉIA MAIS REVOLUCIONÁRIA

A idéia de que a luz tem natureza corpuscular foi classificada por Einstein como a “mais revolucionária” de sua vida. Em 1915, o físico norte-americano Robert Millikan (1868-1953), ao

contrário do que pretendia inicialmente, chegou a resultados que confirmavam a previsão de Einstein sobre o efeito fotoelétrico. Foi principalmente por essa previsão quantitativamente correta que Einstein ganhou o Nobel de 1921 – o prêmio não cita “quanta de luz”, cuja realidade era ainda controversa. Porém, as dúvidas começaram a ser dizimadas em 1923, com a descoberta do efeito Compton – no qual a luz, ao se chocar contra um elétron, comporta-se como um corpúsculo, perdendo energia

– e com os experimentos conduzidos, dois anos depois, pelos físicos alemães Hans Geiger (1882-1945) e Walther Bothe (1891-1957) e também com os resultados dos norte-americanos Arthur Compton (1892-1962) e Alfred Simon.



FUNDAÇÃO NOBEL

Diploma do prêmio  
Nobel de Einstein

# A TESE

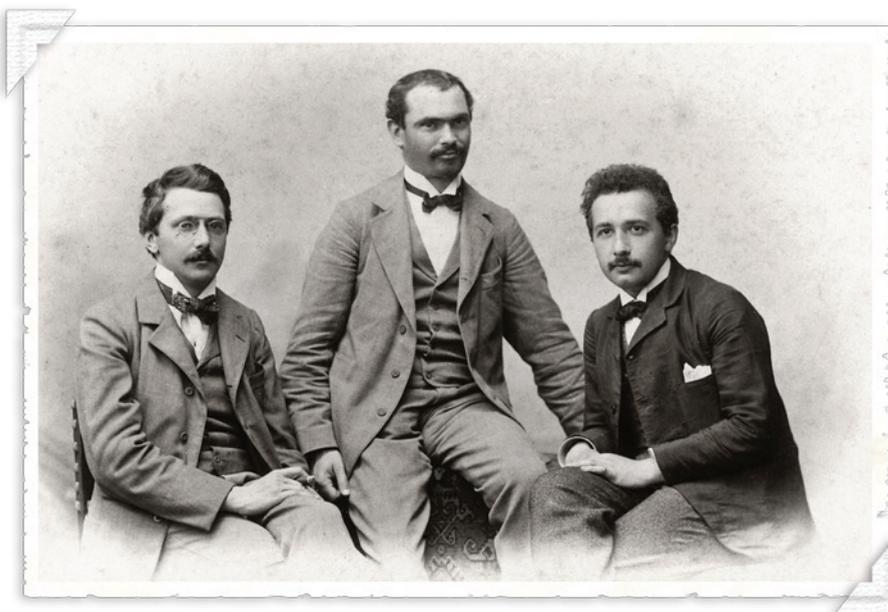
## O MAIS OBSCURO

“Uma nova determinação das dimensões moleculares”. Esse é o título do trabalho mais obscuro daquele ano, finalizado em 30 de abril. Com ele, Einstein obteve, em 15 de janeiro de 1906, o título de doutor pela Universidade de Zurique. Nessa tese, Einstein apresentou um novo método para determinar, entre outras grandezas, os raios de moléculas.

## AÇÚCAR COM ÁGUA

Einstein usou como modelo o açúcar dissolvido na água e obteve boa concordância com os dados experimentais disponíveis na época. Ele formulou um modo indireto que permitia estimar as dimensões de moléculas dissolvidas em um líquido, bastando, para isso, conhecer a viscosidade do lí-

**Membros fundadores  
da Academia Olímpia**



guido – no caso, antes e depois da dissolução do açúcar – e como as moléculas nele imersas se “espalham” (difundem).

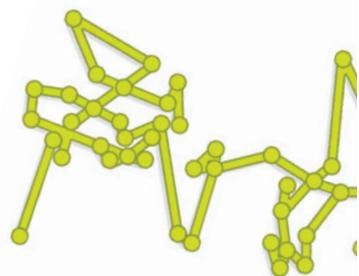
### O MAIS CITADO

Ainda em 1901, Einstein havia enviado à Universidade de Zurique outra tese, mas retirou-a, no ano seguinte, depois de ser alertado de que o trabalho poderia ser rejeitado pela falta de dados experimentais que comprovassem seus resultados teóricos. A tese de 1905 se tornaria seu trabalho mais citado na literatura científica moderna. Razão: tem grande aplicação em outras áreas, da físico-química à construção civil, da indústria de alimentos à ecologia.

## O MOVIMENTO BROWNIANO

### ZIGUEZAGUE ERRÁTICO

Em 1827, o botânico escocês Robert Brown (1773-1858) verificou que grãos de pólen na superfície da água, quando observados no microscópio, apresentavam um “ziguezague” errático. O fenômeno passou a ser conhecido como movimento browniano e, com Einstein, se tornou uma evidência experimental importante da existência de moléculas, assunto ainda controverso no início do século passado.



### ATRAVÉS DE UM MICROSCÓPIO

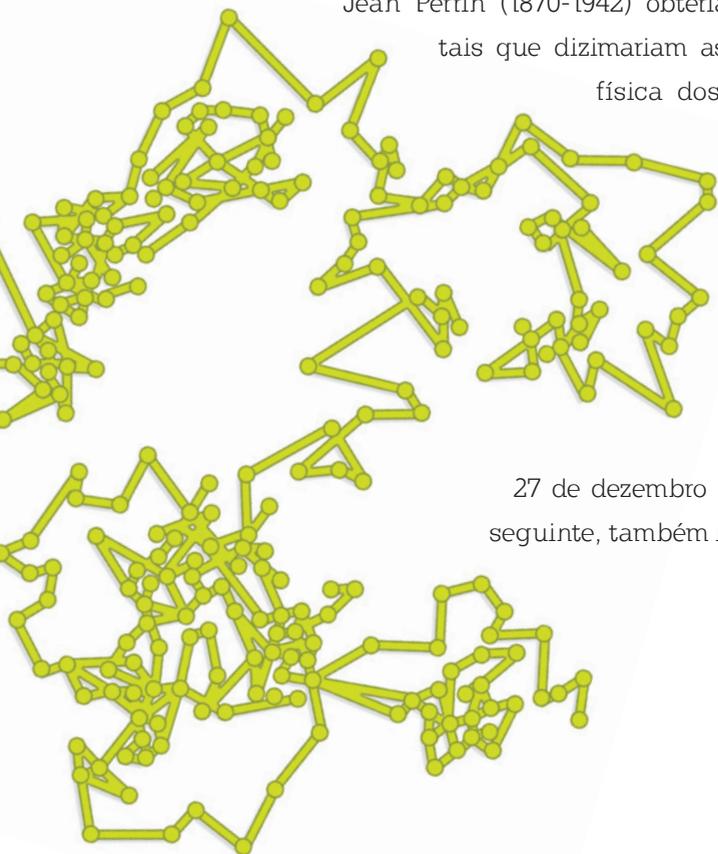
O artigo “Movimento de partículas em suspensão em um fluido em repouso como consequência da teoria cinética molecular do calor” – ou, simplesmente, “Movimento Browniano”, como é mais conhecido – é um desdobramento da tese. Foi recebido para publicação em 11 de maio de 1905. Nele, Einstein inferiu que essa movimentação desordenada era ocasionada pelos choques da partícula com as moléculas do fluido, invisíveis ao microscópio e agitadas em razão de sua energia térmica, que é medida pela temperatura. Einstein previu qual seria o deslocamento médio da posição de cada partícula, ocasionado pelas colisões com as moléculas de água. Isso poderia ser medido com a ajuda de um microscópio.

### REALIDADE DE ÁTOMOS E MOLÉCULAS

Poucos anos depois, com base nesse artigo, o físico francês Jean Perrin (1870-1942) obteria os resultados experimentais que dizimariam as dúvidas sobre a realidade física dos átomos e das moléculas.

Em 1913, Perrin declarou: “A teoria atômica triunfou.” Einstein terminou um segundo artigo sobre o movimento browniano no final de 1905. Ele foi recebido para publicação em

27 de dezembro e só seria publicado no ano seguinte, também na *Annalen der Physik*.



# A RELATIVIDADE

## ASSOMBRADOS PELO ÉTER

O som é uma onda (mecânica) e, portanto, precisa de um meio (gasoso, líquido ou sólido) para se propagar. Raciocínio semelhante levou à hipótese de que era necessário um meio – que preencheria todo o espaço – para servir de suporte à propagação da luz e das outras ondas eletromagnéticas. No final do século 19, o chamado éter, no entanto, passou a assombrar os físicos, que não conseguiam determinar suas propriedades mecânicas e nem mesmo o movimento da Terra em relação a ele.

## DOIS POSTULADOS

Recebido para publicação em 30 de junho de 1905, o artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento” declararia a morte do éter com base em dois postulados: i) as leis da física são as mesmas para observadores inerciais, ou seja, que se movem sem aceleração (princípio da relatividade); e ii) a velocidade da luz no vácuo (cerca de 300 mil km/s) é sempre a mesma, independentemente de a fonte emissora estar parada ou em movimento, ou seja, a velocidade da luz é uma constante da natureza.

## REVISÃO RADICAL

A adoção desses dois postulados levou a uma revisão radical das noções sobre o espaço e o tempo. Em termos simples e com base em fenômenos do cotidiano, pode-se dizer que: i) o relógio de um passageiro dentro de um vagão em movimento andarรก mais devagar quando comparado àquele da

estação – esta é a chamada dilatação temporal; ii) o comprimento de um vagão em movimento parecerá mais curto quando medido por alguém parado na plataforma – esta é a chamada contração espacial; e iii) o que parece simultâneo para um passageiro no vagão em movimento pode parecer não ter ocorrido ao mesmo tempo para uma pessoa na plataforma – este é o problema da simultaneidade. No entanto, esses fenômenos só são significativos – e podem ser medidos – quando nosso vagão imaginário se aproxima da velocidade da luz no vácuo. Nas velocidades a que estamos acostumados no dia-a-dia, esses efeitos são imperceptíveis.

### **E=MC<sup>2</sup>**

Em setembro de 1905, Einstein percebeu outras conseqüências dos dois postulados. Em um artigo de três páginas, “A inércia de um corpo depende de seu conteúdo energético?”, deduziu a fórmula mais famosa da ciência:  $E = mc^2$ . Ela indica que quantidades mínimas de massa (m) – no caso, multiplicada pela velocidade da luz ao quadrado ( $c^2$ ) – podem gerar enormes quantidades de energia (E).

### **RESTRITA**

Unidos, esses dois artigos passaram a ser denominados “teoria da relatividade restrita” – restrita, no caso, por lidar apenas com situações em que os observadores não estão acelerados. Por fim, é preciso dizer que o matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) e o físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928) já haviam deduzido muitas das expressões matemáticas contidas nos dois artigos e influenciaram fortemente o trabalho de Einstein.

# A VIDA

## A INFÂNCIA

Einstein nasceu em 14 de março de 1879, uma sexta-feira, às 11h30 da manhã, em Ülm (sul da Alemanha). Foi o primeiro filho de Hermann (1847-1902) e Pauline Einstein (1858-1920) – dois anos depois, nasceria Maja (Maria, 1881-1951), sua irmã e último filho do casal. Em 1880, a família mudou-se para Munique, e seu pai montou um pequeno negócio de produtos eletromecânicos. Einstein ingressou em uma escola católica da cidade, onde se mostrou um aluno tímido, porém aplicado. Mais tarde, foi estudar no Ginásio Luitpold, cujo método de ensino classificaria como “militar”. Continuou a ser bom aluno, apesar de ter dificuldades com línguas, principalmente grego.



## A JUVENTUDE

Em 1896, matriculou-se no curso de formação de professores de matemática e física da Escola Politécnica de Zurique – nessa época, renunciou à cidadania alemã. Na graduação, faltou a muitas aulas para estudar por conta própria e passou nos exames com ajuda das anotações de um colega de classe, Marcel Grossmann (1878-1936). Sua futura mulher, Mileva Maric (1875-1948), era sua colega de turma e parceira em discussões sobre física nesse período.

**EM BERNA**

Depois de formado, Einstein deu aulas particulares para se manter, formando nesse período um grupo de discussão sobre filosofia e ciência, a Academia Olímpica, com dois colegas. Em 1902, arrumou um emprego como técnico de 3ª classe do Escritório de Patentes em Berna. No ano seguinte, casou-se com Mileva, com quem, pouco antes, havia tido uma filha, Lieserl, nascida no início de 1902 e cujo destino até hoje é desconhecido. O casal teria mais dois filhos: Hans Albert (1904-1973), que se tornaria um renomado engenheiro hidráulico e um dos maiores especialistas em sedimentos do século passado, e Eduard (1910-1965), que, esquizofrênico, morreria em uma clínica psiquiátrica na Suíça.

**EM BERLIM**

Em 1909, Einstein pediu demissão do Escritório de Patentes para se tornar professor de física teórica da Universidade de Zurique. Mais tarde – principalmente por questões financeiras –, transferiu-se para a Universidade Alemã de Praga para, pouco depois, voltar à Politécnica, onde um cargo de



EINSTEIN ARCHIVES

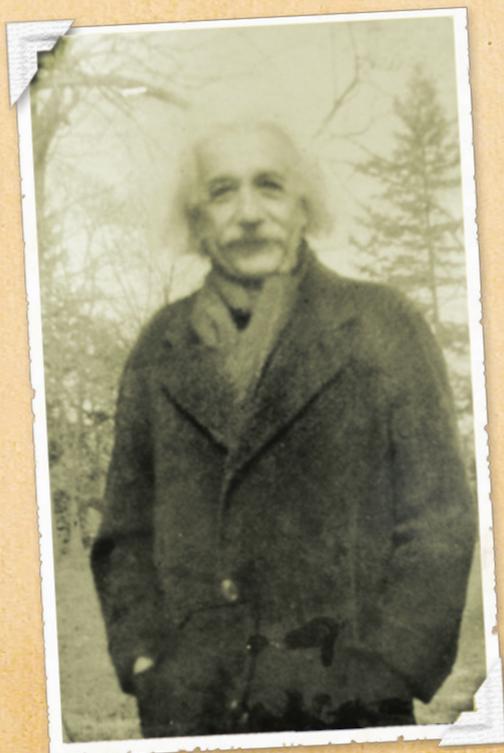
Na página anterior, Einstein ainda criança. À direita, Mileva com os filhos, Eduard e Hans

assistente havia sido negado a ele em 1900. Em 1913, foi convidado a tornar-se membro da prestigiosa Academia Prussiana de Ciências e professor da Universidade de Berlim. Em 1915, terminou a relatividade geral, uma extensão dos trabalhos de 1905 que continha uma nova teoria da gravitação.

### EM PRINCETON

Em 1932, aceitou proposta de trabalho no recém-fundado Instituto de Estudos Avançados, em Princeton (Estados Unidos). Deixou a Alemanha por causa da ascensão do nazismo – ao qual se opunha fortemente – e das perseguições aos judeus. Viveu em Princeton até sua morte, em 18 de abril de 1955, dividindo seus últimos anos de vida entre tentativas infrutíferas para construir uma teoria que per-

mitisse uma descrição unificada dos fenômenos gravitacionais e eletromagnéticos e uma profunda dedicação a causas ligadas à paz e às liberdades civis.



Einstein  
em Princeton

# O CONTEXTO

## CRIATIVIDADE E CAMINHOS

Como um só homem, trabalhando de forma aparentemente isolada da comunidade científica de sua época, pôde chegar a tamanha produção e de tão alto nível em um só ano? Explicar a criatividade de Einstein e os caminhos que o levaram àqueles artigos é uma tarefa complexa. É preciso considerar uma multitude de fatores pessoais e do contexto em que Einstein estava inserido.

## FAMA MUNDIAL

Em 1919, Einstein ganhou fama mundial com a comprovação de uma das previsões da teoria da relatividade geral – o encurvamento da luz nas proximidades do Sol – em um eclipse solar observado em Sobral (Ceará) e na Ilha de Príncipe, na costa oeste africana. O momento – fim da Primeira Guerra Mundial, que havia assombrado o mundo – mostrou-se propício para que os trabalhos de Einstein se destacassem. Na década de 1920, Einstein, já famoso, fez grandes viagens pelo mundo. Em um delas, em 1925, visitou Argentina, Uruguai e passou uma semana no Rio de Janeiro, em maio, onde fez palestras e passeou pela cidade.

**Einstein com cientistas  
no Instituto Oswaldo Cruz,  
Rio de Janeiro, maio de 1925**



# EINSTEIN HOJE

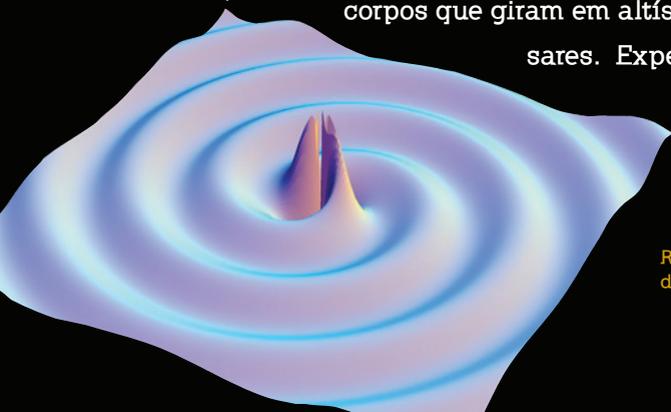
## LASER E ÁTOMO GIGANTE

Os cerca de 300 trabalhos científicos de Einstein ajudaram a aprofundar o conhecimento sobre a natureza da radiação (luz, por exemplo) e da matéria. Alguns deles possibilitaram, a obtenção do laser, em 1960, e previram um fenômeno no qual um aglomerado de átomos, a baixíssimas temperaturas, se comporta como uma entidade única, como um “átomo gigante”. O chamado condensado de Bose-Einstein foi obtido pela primeira vez em 1995.

## BURACOS NEGROS E ONDAS GRAVITACIONAIS

Com base na teoria da relatividade geral, Einstein inaugurou, com um artigo de 1917, a cosmologia moderna. Quanto aos buracos negros – corpos cósmicos que sugam luz e matéria com voracidade –, ele desconfiou de sua existência, apesar de terem sido previstos pela mesma teoria. Hoje, com o acúmulo de evidências experimentais indiretas, acredita-se que esses “ralos cósmicos” existam. A realidade das ondas gravitacionais, outra das previsões dessa teoria, é também tida como certa. Supõe-se que sejam produzidas, por exemplo, em colisões de buracos negros, explosões de estrelas ou por corpos que giram em altíssima velocidade, como os pulsares. Experimentos já estão à caça de mais esse fenômeno previsto pela relatividade geral.

LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION



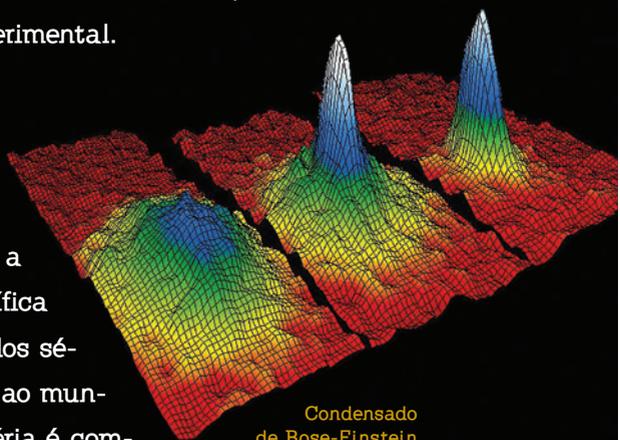
Representação  
de ondas gravitacionais

## DIMENSÕES EXTRAS

Einstein nunca concordou com a maioria dos físicos que criaram a física quântica, pois estes viam as probabilidades e a incerteza como características intrínsecas e irremovíveis do mundo microscópico. Muitos consideram também que Einstein se equivocou ao dedicar as duas décadas finais de sua vida à tentativa de unificar o eletromagnetismo e a gravitação. Outros, porém, alegam que ele, mais uma vez à frente de seu tempo, estava adiantando um campo teórico que só ganharia notoriedade e prestígio nestes últimos anos: a busca de uma teoria unificada. Hoje, as supercordas, teoria em que as partículas elementares são tratadas como diminutas cordas vibrantes em vez de pontos sem dimensão, são a melhor candidata para unificar boa parte dos fenômenos da natureza. No entanto, as supercordas implicam dimensões espaciais extras e várias novas partículas elementares, ambas ainda sem comprovação experimental.

## NO MUNDO NANO

Einstein tem também seu dedo no que talvez seja a maior contribuição científica que a física e a química dos séculos 19 e passado deram ao mundo: a prova de que a matéria é composta por átomos e moléculas. Hoje, esse conhecimento é a base, por exemplo, para a nanociência e a nanotecnologia, que englobam projetar, manipular, produzir e montar artefatos com dimensões atômicas e moleculares por meio da integração da física, da química, da biologia, da engenharia e da informática (ver, desta série, *Nanociência e Nanotecnologia – Modelando o futuro átomo por átomo*).



Condensado de Bose-Einstein