

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 é celebrar os cem 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 – através 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 folder 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. Damos, assim, prosseguimento às atividades de divulgação científica realizadas pelo CBPF, através desta série, que se destina ao público não especializado.

Mais uma vez, esperamos que mais esta iniciativa sirva para despertar vocações entre os jovens estudantes.

João dos Anjos  
COORDENADOR DO PROJETO DESAFIOS DA FÍSICA

PRESIDENTE DA REPÚBLICA  
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
Eduardo Campos

SUBSECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA  
Avílio Antônio Franco

DIRETOR DO CBPF  
Ricardo Magnus Osório Galvão

EDITORES CIENTÍFICOS  
João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT)  
Ildeu de Castro Moreira (Instituto de Física/  
Universidade Federal do Rio de Janeiro)

APOIO FINANCEIRO  
Vítæ

REDAÇÃO E EDIÇÃO  
Cássio Leite Vieira

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

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150  
22290-180 - Rio de Janeiro - RJ  
Tel: (0xx21) 2141-7100  
Fax: (0xx21) 2141-7400  
Internet: <http://www.cbpf.br>

Para receber gratuitamente pelo correio um exemplar deste folder, envie pedido com seu nome e endereço para [iva@cbpf.br](mailto:iva@cbpf.br). Este e outros cinco folders, bem como a revista *CBPF – Na Vanguarda da Pesquisa*, estão disponíveis em formato PDF em <http://www.cbpf.br/Publicacoes.html>

Vítæ não compartilha necessariamente dos conceitos e opiniões expressos neste trabalho, que são da exclusiva responsabilidade dos autores.



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



# Ano Miraculoso de Einstein

100 anos da publicação dos artigos que mudaram a física



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

2005

## Fontes

BRIAN, D. *Einstein – A ciência da vida* (Ática, São Paulo, 1998)  
CIÊNCIA & AMBIENTE. *Einstein* (Universidade Federal de Santa Maria, vol. 30, 2005)  
EINSTEIN, A. *Teoria da relatividade especial e geral* (Contraponto, Rio de Janeiro, 1999)  
EINSTEIN@HOME in *World of Physics 2005* ([www.physics2005.org](http://www.physics2005.org))  
FRIEDMAN, A. e DONLEY, C. *Einstein – As myth and muse* (Cambridge University Press, Cambridge, 1990)  
FURTADO, F. e VIEIRA, C. L. 'As visões de Einstein' (entrevista com John Stachel) in *Ciência Hoje* (n. 214, abril de 2005)  
MOREIRA, I. C. '1905: O ano miraculoso' in *Ciência Hoje* (vol. 36, n. 212, jan/fev 2005)  
MOREIRA, I. C. e VIDEIRA, A. A. P. (orgs.) *Einstein e o Brasil* (UFRJ, Rio de Janeiro, 1996)

PAIS, A. *Einstein viveu aqui* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1997)  
PAIS, A. *Sutil é o senhor – A ciência e a vida de Albert Einstein* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995)  
STACHEL, J. (ORG.) *Ano Miraculoso de Einstein – cinco artigos que mudaram a face da física* (Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 2001)  
SUJIMOTO, K. *Albert Einstein – A photographic biography* (Schocken Books, Nova York, 1989)  
TOLMASQUIM, A. *Einstein – O viajante da relatividade na América do Sul* (Vieira & Lent, Rio de Janeiro, 2004)  
WHITACKER, A. *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma* (Cambridge University Press, 1996)  
WHITROW, G. J. *Einstein – The man and his achievement* (Dover, Nova York, 1973)

## Sumário

### A EFEMÉRIDE

Berço, livro e charuto  
Ano miraculoso

### O EFEITO FOTOELÉTRICO

Elétrons que saltam  
Partículas de luz  
Idéia mais revolucionária

### A TESE

O mais obscuro  
Água com açúcar  
O mais citado

### O MOVIMENTO BROWNIANO

Zigue-zague errático  
Através de um microscópio  
Realidade de átomos e moléculas

### A RELATIVIDADE

Assombrados pelo éter  
Dois postulados  
Revisão radical  
 $E=mc^2$   
Restrita

### A VIDA

A infância  
A juventude  
Em Berna  
Em Berlim  
Em Princeton

### O CONTEXTO

Criatividade e caminhos  
Fama mundial

### EINSTEIN HOJE

Laser e átomo gigante  
Buracos negros e ondas gravitacionais  
Dimensões extras  
No mundo nano

Ano Miraculoso de Einstein

100 anos da publicação dos

artigos que mudaram a física

## 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. Tamanho foi seu feito que 1905 ficou conhecido como Ano Miraculoso (*Annus Mirabilis*).

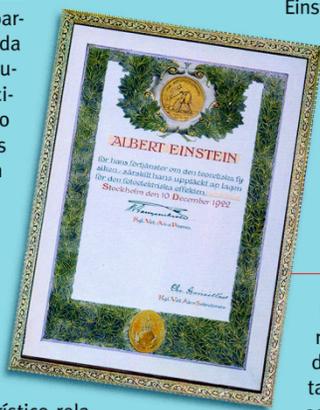


FOTO LUCIFER CHAVAN

## 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. Porém, 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 ideia 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 quantitativa 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.

## A TESE

**O MAIS OBSCURO** • ‘Uma nova determinação das dimensões moleculares’. Esse é o título do trabalho mais obscuro daquele ano, completado 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.



## O MOVIMENTO BROWNIANO

**ZIGUE-ZAGUE ERRÁTICO** • Em 1827, o botânico escocês Robert Brown (1773-1858) observou que grãos de pólen na superfície da água, quando observados no microscópio, apresentavam um ‘zigue-zague’ 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. 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 publicado no ano seguinte, também na *Annalen der Physik*.

**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 líquido – 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.

## 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 para a 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, 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); 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 andarà 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; 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 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.



## 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, onde 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



Mileva e os filhos, Eduard e Hans

FOTOS EINSTEIN ARCHIVES

**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 assistente havia sido negado a ele em 1900. Em 1913, recebeu convite para ser 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 para trabalhar 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 permitisse uma descrição unificada dos fenômenos gravitacionais e eletromagnéticos e uma profunda dedicação a causas ligadas à paz e às liberdades civis.

## 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 levar em conta uma multitude de fatores pessoais e do contexto em que Einstein estava inserido.

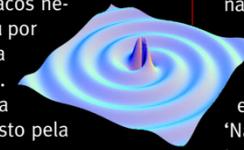
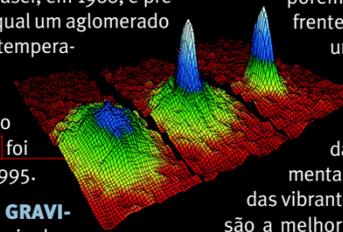
**FAMA MUNDIAL** • Em 1919, Einstein ganhou fama mundial com a comprovação de uma das previsões da teoria da relatividade geral – o encurvamento da luz nas proximidades do Sol – em um eclipse solar observado em Sobral (Ceará) e na Ilha de Príncipe, na costa oeste africana. O momento – final da Primeira 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 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, por exemplo, a obtenção da luz 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.



**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 através da integração da física, química, biologia, engenharia e informática (ver, desta série, ‘Nanociência e Nanotecnologia – Modelando o futuro átomo por átomo’).

JILA UNIVERSITY OF COLORADO

LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION