

# *Annus Mirabilis* de Einstein: artigos que revolucionaram a Física

Hélio Teixeira Coelho e Ricardo Ferreira

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil

Em 2005 comemoramos os cem anos da publicação dos primeiros cinco artigos, entre os mais famosos de Albert Einstein, relacionados com a teoria da relatividade restrita, efeito fotoelétrico e aspectos da teoria quântica. Assim o ano de 1905 é considerado para Einstein o seu *annus mirabilis* (ou seu *ano maravilhoso*), termo usado pelo poeta inglês John Dryden quando escreveu "*Annus mirabilis: the year of*



ALBERT EINSTEIN (1879-1955)

*wonders, 1666*" em alusão ao incêndio de Londres naquele ano e também aplicado a Newton no mesmo ano quando terminou sua mecânica. Einstein representa, certamente, um ponto de inflexão (mudança de direção; ponto de uma curva no qual a concavidade se inverte) na ciência moderna. Outros pontos de inflexão ocorreram no passado, com Sócrates na Grécia antiga, com Galileu e Newton no renascimento, Maxwell, Lorentz, Planck e Hertz no século XIX, e certamente, Einstein, no século XX, só para citar alguns exemplos.

Neste artigo daremos uma visão panorâmica das contribuições mais importantes de Einstein sob vários aspectos, algumas delas não tão bem conhecidas pelo público em geral.

## Cronologia de Einstein

Einstein nasceu em 14 de Março de 1879 em Ulm, Alemanha. Sua família de classe média mudou-se para Munique onde

construiu uma pequena empresa não bem sucedida no ramo de eletricidade. Em Munique, Einstein começou sua educação. Um tio paterno despertou nele o interesse pelas ciências exatas, especialmente a matemática. A escola freqüentada por Einstein tinha métodos pedagógicos bastante rígidos e obsoletos tornando-o um aluno entediado. Como conseqüência, em 1895 ele é reprovado no vestibular para a Escola

Politécnica Federal de Zurique. Depois de sua família ter se mudado para Itália, Einstein continuou seus estudos em Aarau, Suíça. O mito de que Einstein foi um mau aluno é totalmente infundado. Suas notas foram em geral boas, quer na escola secundária, quer no ensino superior. Em 1896 ele finalmente entrou na prestigiosa Escola Politécnica Federal graduando-se em 1900. Nesse período de escola, achou bastante tempo para familiarizar-se com os trabalhos científicos de Boltzmann, Maxwell e de tantos outros. Seu doutoramento veio a acontecer em 1905 pela Universidade de Zurique já que naquela época a Escola Politécnica ainda não dava este título. Devido a sua natureza inquiridora e sua aversão à autoridade foi difícil encontrar uma posição acadêmica em Universidades suíças. Em 1902, através de indicação de seu amigo M. Grossmann, obteve uma vaga de Assistente no Departamento Suíço de Patentes, em Berna. Este trabalho deu-lhe bastante tempo para se dedicar à pesquisa científica. Como resultado, no ano de 1905, Einstein publicou cinco importantes artigos: a

relatividade restrita; o estabelecimento da equivalência massa e energia; a explicação teórica do movimento Browniano; e o efeito fotoelétrico. Um quinto artigo [2], não tão famoso, é baseado em sua tese de doutorado sobre a determinação das dimensões moleculares e não o discutiremos neste artigo.

Em 1909, já com uma reputação científica em alta, torna-se professor assistente da Universidade de Zurique. Em 1910 ele aceita o cargo de professor na Universidade Alemã em Praga, retornando em 1912 para Zurique como professor da Escola Politécnica Federal. Já famoso, em 1913 torna-se professor da Universidade de Berlin, membro do Instituto Kaiser Wilhelm e da Academia Prussiana de Ciências. Como uma generalização da relatividade restrita, ele concebeu uma teoria geométrica de gravitação, cuja versão final foi publicada em 1916 e ficou conhecida como a teoria geral da relatividade. Além deste artigo, ele deu contribuições na teoria da radiação e em problemas de mecânica estatística. Em 1921 recebeu o prêmio Nobel de física “*pelo efeito fotoelétrico e seu trabalho no domínio da física teórica*”. A teoria da relatividade não é mencionada. Naquela época ainda havia muitas resistências, especialmente pelos positivistas na França, em aceitarem a relatividade.

Nos anos de 1920 Einstein interagiu com as duas correntes aparentemente divergentes da mecânica quântica, explicitamente, a forma ondulatória e a forma matricial. Devido à natureza probabilística da então nova mecânica quântica, Einstein se posicionou cético em relação ao sucesso desta teoria. Acreditava ele que a física deveria se desenvolver mais através de proposições geométricas. Foi neste período também que se envolveu com as teorias unificadas de campo, imaginando ele, por exemplo, ser possível unificar o campo gravitacional com o campo eletromagnético através de propriedades puramente geométricas do espaço-tempo. Isto se revelou mais tarde impossível, haja visto a natureza não-quântica da relatividade geral.

Com o advento do nazismo na Alemanha, ele foi forçado,

em 1933, a imigrar para o Estados Unidos tornando-se membro do Instituto para Estudos Avançados de Princeton onde lá permaneceu o resto de sua vida. Em 1940 tornou-se cidadão americano, sua terceira cidadania.

Einstein aposentou-se em 1945 de Princeton e faleceu no dia 18 de Abril de 1955.

## Contribuições Científicas

Possivelmente, Einstein é considerado o Isaac Newton dos tempos modernos pela sua grandiosa contribuição na física. Como dito anteriormente, suas maiores contribuições residem na relatividade restrita, mecânica estatística, a teoria dos fótons da luz, além da teoria da relatividade geral. Daremos a seguir uma visão sobre quatro dos mais importantes artigos publicados por ele na prestigiosa revista científica *Annalen der Physik* em 1905. São eles: a teoria da relatividade restrita; a relação da massa- energia,  $E = mc^2$ ; o efeito fotoelétrico; a interpretação teórica do movimento browniano. Além deles, comentaremos a relatividade geral e a estatística de Bose-Einstein, temas publicados mais tarde, mas igualmente importantes na física.

## Relatividade restrita

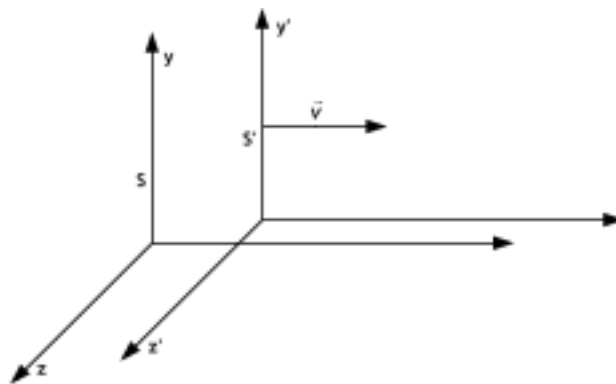


Fig. 1. Referenciais inerciais cartesianos

Esta teoria resultou de estudos profundos sobre a possibilidade de conciliar as leis da mecânica com as leis da electrodinâmica, teorias clássicas já bem conhecidas

no final do século XIX. Com efeito, consideremos a transformação de Galileu em coordenadas cartesianas, entre dois referenciais inerciais  $S$  e  $S'$ , a qual é dada por

$$\begin{aligned}x &= x' + v t' \\y &= y' \\z &= z' \\t &= t'.\end{aligned}\quad (1)$$

Para facilitar usamos a fig. 1 e assumimos que os eixos das coordenadas em  $S$  e  $S'$  são paralelos entre si e que suas origens coincidem num dado instante. Além disto, que o movimento é ao longo do eixo dos  $x$ , e que  $v$  é a velocidade de  $S'$  em relação a  $S$ . A transformação (1) satisfaz às leis da mecânica, mas não às da eletrodinâmica. Outro fato já reconhecido na época na eletrodinâmica era a constância da velocidade da luz,  $c$ , em todos os referenciais inerciais. Isto parecia incompatível com as transformações (1). A solução desse paradoxo começou a ser estudada pelo físico holandês Hendrik A. Lorentz (1853-1928) e ficou conhecida como a transformação de Lorentz. Ela relaciona as coordenadas de  $S$  e  $S'$  admitindo como invariante a velocidade da luz no vácuo. Esta transformação generaliza as eqs. (1) e é dada por

$$\begin{aligned}x &= (x' + v t') \gamma \\y &= y' \\z &= z' \\t &= (t' + vx'/c^2) \gamma,\end{aligned}\quad (2)$$

onde  $\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2}$  e  $\beta = v/c$  [1]. No limite clássico de  $c \rightarrow \infty$ , obtém-se as eqs. (1).

#### QUADRO 1: Postulados da Relatividade Restrita

1. A VELOCIDADE DA LUZ,  $c$ , NO VÁCUO, É INDEPENDENTE DO MOVIMENTO DA FONTE OU DO MOVIMENTO DO OBSERVADOR.
2. QUALQUER FENÔMENO FÍSICO É INVARIANTE EM TODOS OS REFERENCIAIS INERCIAIS.

Certamente, foi através de Einstein que surgiu em 1905 a interpretação filosófica fundamental para a solução desse paradoxo, com a introdução do novo conceito de espaço

plano de Minkowski (espaço-tempo em quatro dimensões) e os postulados da relatividade restrita, mostrados no quadro 1. Foi também através dele que uma mecânica nova e mais abrangente surgiu, como mostrado em seu artigo famoso [2] do ano de 1905. Uma consequência muito importante da relatividade é a relação entre massa em movimento,  $m$ , e energia,  $E$ , dada pela equação

$$E = mc^2, \quad (3)$$

ou seja, uma dada massa  $m$  de um corpo em movimento pode se transformar em energia. Por exemplo, a reação  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$  ilustra bem este fato. Um elétron ao se chocar com um pósitron, ambos se aniquilam, gerando luz, através da criação de dois fótons. Este processo foi um dos vários para o desenvolvimento da física nuclear criando a possibilidade da fabricação de armas nucleares, como previsto na carta assinada por Einstein ao presidente Roosevelt.

A eq. (3) é provavelmente a única equação da física reconhecida popularmente e consta do seu segundo artigo famoso sobre a teoria da relatividade publicado no ano de 1905 [2].

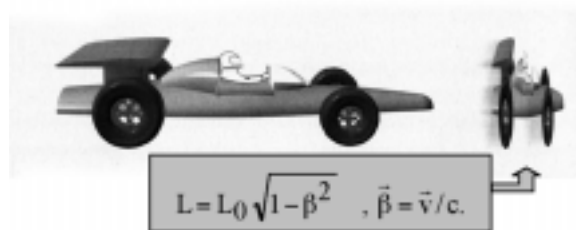


Fig. 2. Um objeto em repouso de comprimento  $L_0$  encurtará na direção do movimento.

Outro fato marcante resultante desta teoria diz respeito a observadores em referenciais inerciais distintos. Um observador, em um referencial em repouso, verá que um objeto em movimento encurtará, conforme mostrado na fig. 2. Já os tempos medidos em um relógio em movimento serão atrasados. Ou seja, teremos contração dos espaços e dilatação dos tempos em referenciais inerciais relativísticos. O famoso paradoxo dos gêmeos ilustra bem



Fig. 3. No quadro *Batalha das Amazonas* do pintor flamengo renascentista Rubens (1577-1640), nota-se o movimento, influência da física da época.



Fig. 4. Pintura de Salvador Dalí, *A Persistência da Memória*, pintado no século XX, com aparente influência da relatividade restrita pela deformação do relógio.

a dilatação dos tempos. Dois gêmeos idênticos resolvem, um ficar na Terra, e o outro pilotar uma nave espacial a uma velocidade constante próxima à da luz,  $c$ . No seu regresso à Terra, ao mesmo ponto, encontra seu irmão envelhecido, enquanto ele permanece jovem! Este fato pode ser explicado utilizando as eqs. (2).

A arte imita a vida (ou seu inverso), já dizia o filósofo. Pois bem, através das figuras 3 a 5, elas parecem nos mostrar como a pintura evoluiu com o desenvolvimento da física, desde o renascimento até a fase moderna da arte de Salvador Dalí e Picasso.

## Um debate filosófico importante

Em seu livro *Como vejo o mundo* [3], Einstein mostra como ele se envolveu em debates filosóficos importantes. Um deles é ligado à questão de se saber se uma dada teoria científica “verdadeira” poderia advir ou não da experimentação. “*Segundo nossa experiência, até hoje, temos o direito de estar convencidos de que a natureza é a realização do que podemos imaginar de mais simples matematicamente. Estou persuadido de que a construção puramente matemática nos permite encontrar esses conceitos e os princípios que os ligam entre si e que nos fornecem a chave da compreensão dos fenômenos naturais. Os conceitos matemáticos utilizáveis podem ser sugeridos pela experiência, mas não podem, em hipótese alguma, ser dela deduzidos*”. (A. Einstein, *Ideas and opinions*, pp. 273-274, Souvenir Press, Crown Publ., New York, 1954).

Esta é uma questão filosófica fundamental que remonta da Grécia antiga e foi levantada pela primeira vez por Platão. Por teorias científicas “verdadeiras”, entende-se como bons exemplos a geometria Euclidiana e a mecânica Newtoniana, ambas ligadas ao arcabouço da lógica formal.



Fig. 5. Pintura de Picasso na fase cubista. Note a deformação do espaço.

Este arcabouço exige uma sistematização para a construção de uma teoria científica, partindo de definições, seguidas de axiomas e postulados, tendo a matemática como ferramenta operacional. O quadro 2 ilustra a geometria Euclidiana como uma teoria científica “verdadeira”. Por conhecimento “verdadeiro” entende-se aquele que é fundamental e universal numa utopia a ser alcançada. Está claro que este “verdadeiro” tem suas limitações para cada teoria. Na geometria Euclidiana, por exemplo, o 5º postulado não é geral, bastando aplicá-lo sobre uma esfera. Outras geometrias mais modernas vieram a mostrar isto também. Mesmo assim, a geometria euclidiana não deixa de ser fundamental e universal para espaços planos

bidimensionais limitados. O mesmo pode se dizer para as famosas leis de Newton, desde que as velocidades envolvidas sejam  $v \ll c$ . A frase de Einstein a seguir aplica-se com maestria às teorias científicas verdadeiras: “*Não pode haver melhor destino para a teoria física do que abrir margem para uma teoria ampla, na qual sobreviva como caso limite*”. Certamente, o critério de refutabilidade e falseabilidade de Karl Popper (1902-1994) é aceito neste contexto, ou seja, “*uma teoria totalmente imune a teste não pode ser considerada uma teoria científica*”.

Finalmente, foi com a relatividade restrita e com a eletrodinâmica clássica que Einstein mostrou enfaticamente que uma teoria científica não pode advir da experimentação. Certamente, a observação experimental não deixa de ter sua importância fundamental na física, principalmente na sugestão de uma teoria científica verdadeira. Mesmo a criação da geometria euclidiana teve possivelmente, sua motivação na divisão agrária na antiguidade.

Um outro ponto importante discutido por este cientista na referência [3], refere-se à evolução do conceito de espaço. Na Grécia antiga este conceito ainda não aparece. Só com R. Descartes (1596-1650), na criação da geometria analítica, e Isaac Newton (1642-1727) na criação do cálculo infinitesimal e da mecânica clássica, é que este conceito toma um formato seguindo a seguinte seqüência lógica:

Descartes e Newton:

**Objetos** → **Posições Relativas** → **Intervalo** → **Espaço**.

O conceito de espaço evoluiu posteriormente, com os trabalhos de grandes matemáticos tais como Gauss (1777-1855), Riemann(1826-1866), Grossmann,..., formando uma nova seqüência lógica:

**Espaço** → **Intervalo** → **Posições Relativas** → **Objetos**.

Note a inversão na posição da palavra **Espaço** que passa a ocupar o primeiro lugar em sua definição.

Uma associação mnemônica simples pode ser feita com este esquema. Podemos associar o **espaço** a um **palco**. Neste **palco** definimos as marcações (**intervalos**, **posições relativas**) para colocação dos **atores (objetos)**.

#### QUADRO 2: Geometria Euclidiana, um bom exemplo de teoria científica

##### LÓGICA FORMAL (OU MENOR)

###### DEFINIÇÕES (23)

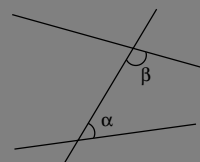
1. PONTO É O QUE NÃO TEM PARTES.
2. LINHA É UM COMPRIMENTO SEM LARGURA.
3. AS EXTREMIDADES DE UMA LINHA SÃO PONTOS.
4. UMA LINHA RETA É UMA LINHA QUE SE AJUSTA IGUALMENTE COM TODOS SEUS PONTOS SOBRE SI MESMA.
5. SUPERFÍCIE É O QUE SÓ TEM COMPRIMENTO E LARGURA.
6. AS EXTREMIDADES DE UMA SUPERFÍCIE SÃO LINHAS.
7. ...23.(ÂNGULOS, TRIÂNGULOS, CIRCUNFERÊNCIA, PARALELAS, ETC.).

###### AXIOMAS

1. DUAS COISAS IGUAIS A UMA TERCEIRA SÃO IGUAIS ENTRE SI.
2. SE COISAS SÃO ADICIONADAS A COISAS IGUAIS, OS RESULTADOS SÃO TAMBÉM IGUAIS.
3. SE COISAS SÃO SUBTRAÍDAS DE COISAS IGUAIS, OS RESULTADOS SÃO TAMBÉM IGUAIS.
4. COISAS QUE COINCIDEM SÃO IGUAIS.
5. O TODO É MAIOR QUE A PARTE.

###### POSTULADOS

1. DESENHAR UMA RETA DE UM PONTO QUALQUER A OUTRO PONTO QUALQUER.
2. PROLONGAR UM SEGMENTO DE RETA CONTINUAMENTE EM UMA RETA.
3. DESCREVER UMA CIRCUNFERÊNCIA COM CENTRO DADO E RAIO DADO.
4. TODOS OS ÂNGULOS RETOS SÃO IGUAIS.
5. SE UMA RETA CORTA OUTRAS DUAS RETAS E FAZ ÂNGULOS INTERNOS DO MESMO LADO MENORES DO QUE DOIS ÂNGULOS RETOS, AS DUAS RETAS SE PROLONGADAS INDEFINIDAMENTE SE ENCONTRAM DO LADO EM QUE OS ÂNGULOS SÃO MENORES DO QUE DOIS ÂNGULOS RETOS.



$$\alpha + \beta < 180^\circ$$

OBSERVAÇÃO: O 5º POSTULADO PODE TAMBÉM SER ASSIM ENUNCIADO: POR UM PONTO FORA DE UMA RETA PODE-SE SOMENTE TRAÇAR UMA ÚNICA LINHA PARALELA A ESSA RETA

Como ilustração, daremos dois exemplos do uso do último conceito de espaço para construir teorias físicas.

#### **Relatividade Restrita**

Supor válidos os postulados da relatividade restrita. Definimos agora o espaço (espaço-tempo físico de Minkowski) através da métrica de Riemann (**palco**):

$$ds^2 = \sum_{\alpha\beta} g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta. \quad (4)$$

Quais as leis mais simples deriváveis? Prova-se que são as da teoria da relatividade restrita [4]!

### Eletrodinâmica Clássica

Considera-se válido os postulados da relatividade restrita. No espaço-tempo (Minkowski) (**palco**), coloca-se um campo de tensores anti-simétricos apropriados (**atores**) e as equações de Maxwell no vácuo são obtidas através de cálculos complicados [3]! (**espetáculo**).

Para o leitor não familiarizado com a física mais avançada, sugerimos pular para a eq. (10).

Com efeito, supor a invariância da carga:

$$\partial_\alpha J^\alpha = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0, \quad (5)$$

onde  $J^\alpha \equiv (\rho c, \vec{J})$  corresponde ao quadrivetor corrente.

São válidas as equações de calibre de Lorentz para o quadrivetor potencial,

$$A^\alpha = (\Phi, \vec{A}): \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \square A^\alpha = \frac{4\pi}{c} J^\alpha \quad \text{ou} \quad \left[ \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right] \begin{bmatrix} \Phi \\ \vec{A} \end{bmatrix} = \frac{4\pi}{c} \begin{bmatrix} \rho c \\ \vec{J} \end{bmatrix} \\ \partial_\alpha A^\alpha = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \end{array} \right.$$

Os campos eletromagnéticos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  são obtidos de  $A^\alpha$  pelas equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \end{array} \right. \quad (7)$$

Define-se, apropriadamente, o tensor (anti-simétrico) eletromagnético:

$$F^{\alpha\beta} \equiv \partial^\alpha A^\beta - \partial^\beta A^\alpha. \quad (8)$$

As equações de Maxwell (no vácuo), em forma tensorial, são então obtidas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_\alpha F^{\alpha\beta} = \frac{4\pi}{c} J^\beta, \\ \partial^\alpha F^{\beta\gamma} + \partial^\gamma F^{\alpha\beta} + \partial^\beta F^{\gamma\alpha} = 0. \end{array} \right. \quad (9)$$

As equações de Maxwell na forma vetorial são mais conhecidas e são dadas por

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (10)$$



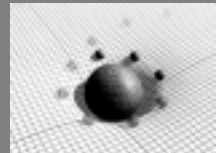
## ...Fiat lux !

## Relatividade Geral

Em torno de 1907, Einstein chegou à conclusão que o campo eletromagnético deveria ser influenciado por campos gravitacionais. A teoria gravitacional de Newton previa que qualquer alteração num campo gravitacional seria sentida instantaneamente em todas as partes do universo. Isto estava em desacordo com o eletromagnetismo, já que lá, conforme visto, a velocidade da luz era o limite superior de qualquer velocidade. Para sanar este impasse, percebeu ele que se existisse uma forte correlação entre uma aceleração e um campo gravitacional, isto poderia ser resolvido. Einstein chamou esta correlação de princípio de equivalência. Admitindo que a geometria do espaço-tempo fosse curva, e não plana, como na relatividade restrita, a teoria da relatividade geral deveria emergir.

### QUADRO 3: Postulados da relatividade geral

1. A VELOCIDADE DA LUZ,  $c$ , NO VÁCUO É INDEPENDENTE DO MOVIMENTO DA FONTE OU DO MOVIMENTO DO OBSERVADOR.
2. PRINCÍPIO DE EQUIVALÊNCIA: EM UMA ESCALA LOCAL, OS EFEITOS FÍSICOS DE UM CAMPO GRAVITACIONAL NÃO SÃO DISTINGUÍVEIS DOS EFEITOS FÍSICOS DE UM SISTEMA DE COORDENADAS ACELERADO.



O quadro 3 fornece os postulados da relatividade geral.

O trabalho de Einstein sobre a relatividade geral foi publicado somente em 1916. Na sua elaboração ele teve acesso aos trabalhos pioneiros de Gauss e de Riemann sobre espaços multidimensionais curvos [5]. Teve também a ajuda crucial do físico-matemático M. Grossmann, além de outros pesquisadores da época. Convém citar que, independentemente, o físico-matemático D. Hilbert (1862-1943) chegou também em 1915 às mesmas equações obtidas por Einstein em sua teoria. Tal teoria tem sido checada experimentalmente, desde sua publicação, com absoluto sucesso. Outras teorias de gravitação existem mas nenhuma tem tido o mesmo desempenho da relatividade geral. Sua aplicação em áreas como a astrofísica e a cosmologia tem se mostrado altamente promissora. Fatos experimentais, como o desvio da luz na presença de fortes campos gravitacionais, foram observados conforme previsto pela teoria. Vale aqui destacar a verificação experimental histórica através do eclipse do sol observado na cidade de Sobral, no estado do Ceará, em 29 de Maio de 1919. Uma placa alusiva ao evento foi lá colocada em Julho de 2005 pelo Conselho Britânico e a Sociedade Brasileira de Física com a presença oficial de um dos autores deste artigo (R. Ferreira).

Note que no limite  $c \rightarrow \infty$ , a relatividade geral reproduz a teoria gravitacional de Newton, como esperado.

## Movimento Browniano

Antes da publicação dos seus quatro famosos artigos em 1905, Einstein publicou em 1902 artigos sobre fundamentos da mecânica estatística. Ele teve a idéia de aplicar sua teoria ao movimento browniano [1], já então conhecido heurísticamente. Em 1827 o botânico inglês Robert Brown observou que grãos de pólen flutuavam na água em movimento de zig-zag. Similar fenômeno ocorria em outros casos, tais como a poeira observada em uma fresta de luz num quarto escuro. Este movimento aleatório foi chamado de browniano. Einstein mostrou analiticamente que através do movimento térmico das moléculas do líquido (ou no ar,

para a poeira), choques delas com as partículas de pólen (ou as suspensas no ar) ocasionavam o observado zig-zag. Independentemente, o físico polonês Marian Smoluchowski (1872-1917) chegou ao mesmo resultado. Esta explicação teórica do movimento browniano foi publicada em 1905 por Einstein [2] como a primeira prova visível da constituição molecular da matéria.

## Efeito fotoelétrico

As experiências de fendas duplas de Young tinham levado cientistas a acreditarem ainda mais na natureza ondulatória da luz. Um novo fenômeno, chamado de efeito fotoelétrico [1], veio perturbar este cenário. Tal efeito foi observado em final do século XIX pelo físico H. Hertz. Elétrons próximos à superfície de certos metais escapavam com a incidência de luz. Através de cálculos, utilizando a física clássica, observou-se uma inconsistência com as observações experimentais. Assim vejamos:

- a) não havia uma intensidade crítica da luz, contrariando o que apregoavam os cálculos da física clássica;
  - b) a energia dos elétrons emitidos independia da intensidade da luz, contrariando a física clássica;
  - c) a energia dos elétrons dependia da frequência da luz e crescia linearmente com ela, além de haver uma frequência limiar para o fenômeno acontecer.
- De novo, estava em desacordo com a física clássica.

Em 1900, o grande físico alemão Max Planck (1858-1947), vencedor do Nobel de Física de 1918, propôs um modelo físico para explicar o espectro de frequências da radiação de uma cavidade quente, o qual é gerado pelas oscilações dos átomos em suas paredes. Tal modelo consistia de osciladores harmônicos lineares representando os átomos em oscilação, de modo que pudessem assim emitir luz somente como um múltiplo inteiro de um dado valor da energia,  $E_n = nhf$ ,  $n=0,1,2,\dots$ , sendo  $f$  a frequência do oscilador e  $h$ , posteriormente a ser chamada constante fundamental e universal de Planck, de valor  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  Joule. seg. Note que  $hf$  é chamado de quantum de energia.

Estudando cuidadosamente o efeito fotoelétrico, Einstein propôs em 1905 estender a hipótese de Planck para a luz tal que ela fosse discretizada em quanta de luz, cada quantum com energia  $hf$ . Esses quanta de luz passaram mais tarde a se chamar de fótons, nome dado pelo físico americano Gilbert Lewis em 1926, e se comportam de forma similar às partículas elementares. Quando um fóton colidisse com um elétron em um metal, haveria uma transferência de energia-momentum, gerando a possibilidade da ejeção do elétron. A hipótese corpuscular da luz originalmente vem de Newton, mas só com Einstein isto veio a vingar. Ela conseguiu explicar rigorosamente o efeito fotoelétrico [2]. Foi necessária uma grande revolução na física, então, com a hipótese, mais tarde confirmada e aceita pela comunidade científica, de que a luz tem também uma natureza dual, ora se comportando como onda, ora como partícula. Com o advento da mecânica quântica na década de 1920, este fato recebeu o nome de princípio da complementaridade, ou seja, a dualidade onda-partícula. Deve-se isto ao físico M. Bohr (1885-1962), vencedor do Nobel de Física em 1922.

A fig. 6 mostra o mecanismo quântico do efeito fotoelétrico. Um elétron de energia  $-W_0$  próximo à superfície de um certo metal está a ele preso e sente um "poço" de potencial criado pelos demais elétrons do metal. Este elétron absorve um fóton de energia  $hf$  e efetua uma transição para um nível de energia mais alto. Por exemplo, a luz amarela tem menos chance de expulsar elétrons do que a luz violeta (frequência maior). Se esta energia de transição for suficientemente alta, ele escapará com uma energia cinética máxima possível, dada por

$$K_{\max} = hf - W_0 \quad (11)$$

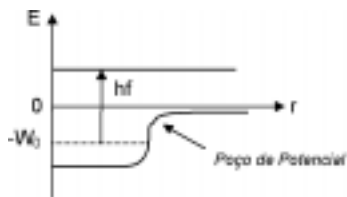


Fig. 6. O elétron próximo à superfície de um certo metal de energia  $-W_0$  absorve um fóton de energia  $hf$  e efetua uma transição para um nível mais alto.

A eq. (11) fornece o gráfico da fig. 7 e está de acordo com os dados experimentais.

Einstein deu grandes impulsos iniciais para a criação da mecânica quântica. Contudo, a natureza probabilística e não determinista desta teoria o levou a não aceitá-la integralmente. É dele o famoso refrão "*Deus não joga dados*". Como mencionado antes, ele acreditava que o futuro da física estava em sua geometrização, o que mais tarde se revelou não ser exatamente o caminho mais apropriado. Mas isto já é outra história!

As vitoriosas, a mecânica quântica e a relatividade, são exemplos eloqüentes de teorias científicas "verdadeiras" para a descrição do macro e do microcosmo. A física nuclear, por exemplo, usa plenamente estas teorias. O artigo de divulgação científica de um dos autores (H.Coelho) publicado na *Ciência Hoje* [6] bem ilustra este ponto.

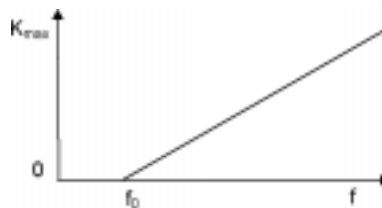


Fig. 7. Gráfico da energia cinética máxima do elétron ejetado, em função da frequência da luz. A Frequência  $f_0$  é a frequência limiar do processo.

## Estatísticas de Bose-Einstein

O físico hindu S. M. Bose, sabedor da fama de Einstein como grande físico e conhecedor da mecânica estatística, enviou-lhe em 1924 um artigo de sua autoria sobre gases monoatômicos para por ele ser comentado. Einstein verificou neste artigo a genialidade do referido físico. Além dos comentários pedidos, lhe propôs também algumas modificações. O artigo foi publicado em 1925, junto com uma nota de Einstein, e passou a ser uma referência na física. Basicamente, a idéia consiste em que na natureza microscópica, partículas com spin inteiro obedecem a uma estatística quântica, que veio a ser conhecida como estatística de Bose-Einstein [1]. Spin é o momentum angular intrínseco de uma partícula elementar que assume só



valores discretos, sendo um múltiplo inteiro ou semi-inteiro de  $\hbar$ , onde  $\hbar = h/2\pi$ . As partículas que têm spin inteiro são chamadas de bósons. É o caso do fóton que tem spin 1. Já as partículas com spin semi-inteiro, são chamadas de férmions e obedecem à estatística de Fermi-Dirac, em homenagem aos seus descobridores, os físicos E. Fermi (1901-1954) e P. Dirac (1902-1982), ambos vencedores do Nobel, de 1938 e 1933, respectivamente. Exemplo de um férmion é o elétron, que tem spin 1/2. Na estatística de Bose-Einstein, bósons podem ocupar, simultaneamente, os mesmos níveis quânticos, enquanto isto não é possível para férmions na estatística de Fermi-Dirac.

As contribuições científicas de Einstein mencionadas acima são as que mais lhe deram destaque na comunidade científica. Elas, certamente, não são as únicas. Na última fase de sua vida em Princeton, ele se dedicou à teoria unificada dos campos, principalmente, na procura de uma unificação da relatividade geral com o eletromagnetismo. Não o conseguiu, basicamente, porque esta unificação exigiria a quantização da teoria da relatividade geral, fato este ainda em aberto nos dias de hoje. Muito progresso na física foi, no entanto, feito após sua morte em 1955. Como exemplo deste progresso, a unificação da eletrodinâmica quântica com as interações fracas, gerando a teoria eletrofraca, e a descoberta da cromodinâmica quântica, que explica as forças nucleares.

Como visto acima, em algumas das descobertas de Einstein nota-se a contribuição de outros importantes físicos, alguns deles pouco mencionados pelos meios de comunicação. Mas o próprio Einstein, enquanto vivo, procurou homenageá-los, demonstrando um lado justo de sua personalidade.

## Personalidade

A personalidade de Einstein foi tão marcante quanto o seu trabalho científico. Além de carismático, tinha um traço de nobreza, simplicidade e integridade, tornando-o uma pessoa agradável na convivência diária. Era uma pessoa

versátil e com grande cultura. Conhecia bem música de modo a dominar o violino. Envolveu-se com religião, política e pacifismo, filosofia e a causa judaica, conforme discutiremos brevemente abaixo.

### *O Deus de Einstein*

A religiosidade de Einstein não se encaixava na ortodoxia [7]. *"Acredito no Deus de Espinosa, revelado na harmonia de tudo o que existe, mas não em um Deus que se preocupa com os destinos e as ações dos homens"*, (um telegrama enviado em 1829 para um jornal judaico). Para Einstein, a ciência é essencialmente uma atividade religiosa, que usa a razão para desvendar os mistérios da natureza. Dizia ele: *"O comportamento ético dos homens deve se basear na simpatia, educação e nos laços sociais; não é necessária base religiosa. Os homens estariam em péssima situação se tivessem que ser controlados pelo medo da punição [divina] ou pela esperança de salvação após a morte."* (*"New York Times Magazine"*, 9 de Novembro de 1930.) Aqui Einstein argumenta que a religião organizada não é necessária para estabelecer as bases de um comportamento ético. Impor o controle social pelo medo ou pelas crenças mostra o quão imaturo é ainda o homem. A essência do equilíbrio social não se encontra na religião mas no respeito à vida, ao outro, ao mundo. Einstein (1879-1955) sobreviveu a duas guerras mundiais, foi testemunha do genocídio de 6 milhões de judeus pelos nazistas, de um número ainda maior de russos por Stalin, de centenas de milhares de japoneses pelas bombas atômicas americanas. Se estivesse vivo hoje, veria que pouco mudamos. Imagino que se trancaria em seu escritório e tentaria desvendar mais um mistério, rabiscando fórmulas matemáticas em um papel, a única prece que acreditava poder purificar a sua essência.

### *Viagens*

Einstein, quando ganhou o Nobel em Física em 1921, já era um homem famoso em todo o mundo. Por conta disto, viajou bastante proferindo conferências ou se engajando em diversas causas.

Não tão bem conhecido é o fato de que esteve em 1925 visitando Buenos Aires, de 25 de Março a 23 de Abril, Montevideo, de 24 a 29 de Abril e o Rio de Janeiro de 4 a 12 de Maio. Neste artigo daremos alguns destaques desta viagem.

Na sua ida à Argentina fez uma curta visita ao Rio no dia 21 de Março. Em Buenos Aires e no seu retorno ao Rio de Janeiro teve uma grande atividade intelectual, bem como turística [8]. Proferiu conferências e participou igualmente de várias atividades sociais, fruto de sua popularidade, atraindo assim multidões aonde se dirigisse. No Brasil, a ciência e em particular a física, ainda se encontrava em estágio incipiente. Mesmo assim, já existiam bons livros e artigos científicos publicados por cientistas brasileiros sobre a teoria da relatividade [9]. Uma comunicação de Einstein à Academia Brasileira de Ciências (ABC) em 7 de Maio de 1925 [10] vale a pena ser mencionada. Intitulada “*Observações sobre a situação atual da teoria da luz*”, fora redigida em alemão em papel timbrado do famoso Hotel Glória no Rio, onde se hospedou. Parece não figurar na maioria das extensas listas existentes de publicações sobre o cientista. Quando esta conferência foi proferida na ABC, Einstein já conhecia resultados preliminares, mas ainda não publicados, da experiência de Bothe e Geiger que comprovariam a natureza dos fótons de quanta e da teoria da relatividade restrita [1]. Assim, não só o efeito fotoelétrico, mas também o efeito Compton [1], são ambos explicados por estes mecanismos teóricos. As repercussões desta visita nos meios científicos de então variou. Os contras, normalmente vinham de uma formação filosófica positivista, muito em moda na época, e fruto da forte influência positivista francesa na educação. Uns poucos vanguardistas, favoráveis, tiveram um papel magistral naquele período. Vale aqui destacar os nomes dos cientistas Luiz Freire em Recife e Amoroso Costa no Rio [9]. Também o respeitado sociólogo-antropólogo Gilberto Freyre de Recife, em artigo publicado em 1925 no mais antigo jornal em circulação na América Latina, o *Diário de Pernambuco*, sob o título *Einstein Regionalista* [9], destaca com alegria a apologia do regionalismo feita pelo cientista em sua visita ao Brasil.

Curiosamente, este trabalho de Einstein, publicado nos anais da Academia Brasileira de Ciências foi, em certo sentido, a última contribuição realmente positiva dele para a Física. Naquele mesmo ano, 1925, W. Heisenberg publicou o primeiro artigo introduzindo a mecânica quântica, ampliada por Heisenberg, Born e Jordan em 1926, ano no qual E. Schrödinger publicou sua versão da mecânica quântica, a mecânica ondulatória. Acontece que Einstein nunca se convenceu do mérito extraordinário desses desenvolvimentos, considerando-os incompletos. Einstein, por exemplo, nunca aceitou completamente a relação de incerteza de Heisenberg ( $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2\pi$ ).

Em 1935, com Poldosky e Rosen, Einstein tentou mostrar que a mecânica quântica violaria o limite da velocidade da luz, mas essas considerações foram respondidas de maneira efetiva por Niels Bohr e Max Born.

Também fracassaram suas tentativas, feitas com colaboradores, como Leopoldo Infeld, para obter a teoria do campo unificado (os campos clássicos, gravitacional e o eletromagnético). Na realidade, na mesma época (1936), Hideki Yukawa propôs que os nucleons (prótons e nêutrons) interagem através de um campo bem diferente, o chamado campo de Yukawa, ou das forças nucleares fortes descrito via a mecânica quântica. Ainda existe a chamada força fraca, que aparece, por exemplo, na desintegração beta.

### **Política e Pacifismo**

Em 1915, em plena guerra de 1914-1918, Einstein assina o Manifesto aos Europeus, referente à criação de uma liga das nações como forma de pacificar o continente europeu. Em 1922 é indicado membro do Comitê de Cooperação Intelectual da Liga das Nações que daria mais tarde origem à Organização das Nações Unidas (ONU) com sede em New York. Teve também grande participação na causa judaica através do movimento sionista. Mesmo com sua amizade com Chaim Weizman, por exemplo, declinou um convite para ser presidente de Israel em 1952. Em uma carta a ele dirigida, Einstein afirmara que concordava com a criação do estado de Israel desde que os direitos dos árabes fossem respeitados.

Em 1939 ficou claro que dois físicos alemães, Otto Hanh e Fritz Strassmann tinham descoberto a fissão nuclear. O grande físico italiano Enrico Fermi, juntamente com outros físicos húngaros famosos, Szilard e Wigner, resolveu convidar Einstein para que ele assinasse uma carta por eles redigida e dirigida ao então presidente Roosevelt alertando-o sobre a possibilidade da Alemanha nazista construir a devastadora bomba atômica. Desta carta que tanto impressionou o presidente, resultou o Projeto Manhattan que deu origem à bomba atômica americana. Na realidade a Alemanha nazista rendeu-se em Maio de 1945, antes do primeiro teste com a bomba atômica, feito em Alamogordo, New Mexico, em Julho do mesmo ano. Assim mesmo, e contra a opinião de vários cientistas participantes do Projeto Manhattan, como Franck, Szilard e Urey, o governo americano (Presidente Truman) autorizou o uso da bomba atômica contra duas cidades do Japão (Hiroshima e Nagasaki), que forçou o Japão a se render, finalmente, aos aliados (Agosto de 1945).

### **Vida Privada**

Sua vida privada, ao que parece, foi bastante discutível. Casou-se em 1903 com uma colega de turma da Escola Politécnica Federal de Zurique, Mileva Maric (1875-1948), de origem Sérvia, inteligente e de grande personalidade. Seu profundo conhecimento em matemática foi decisivo nos trabalhos iniciais de Einstein. Deste casamento nasceram dois filhos, Hans Albert (1904-1973) e Eduard (1910-1965). O primeiro foi professor de engenharia hidráulica na Universidade da Califórnia, já o segundo morreu relativamente cedo, com distúrbios psiquiátricos. Einstein parece ter tido também uma filha, mas não se conhece seu paradeiro. Divorciou-se de Mileva em 1914.

Em 1919, o físico alemão-suíço casa-se com sua prima Elsa Einstein (1876-1936), recém viúva e com dois filhos. Após a morte de Elsa, em 1936, Einstein não mais casou, mas teve em Helen Dukas (1896-1982) uma férrea secretária até o fim de sua vida.

### **Achados Recentes**

Em 1986 foram descobertas por R. Schulman (historiador da equipe do Projeto Einstein, organizado pela Universidade de Boston), numa caixa forte de um banco na Califórnia, cartas trocadas entre Einstein e sua primeira esposa Mileva [5]. Muita coisa nova aflorou, principalmente, sobre a personalidade mais íntima do cientista. Este projeto resultou na obra "*The collected papers of Albert Einstein*", com cerca de 40 volumes, publicada pela Princeton University Press. Parece haver um lado pouco estimável em sua personalidade no que se refere ao seu relacionamento com Mileva e seu desempenho como pai. Em sua obra não deu o devido crédito ao papel científico desempenhado pela primeira esposa. Parece que estes fatos morrerão com a história...

### **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de agradecer ao Professor Dr. Fernando Cardoso, da Universidade Federal de Pernambuco, pela sugestão para escrever este artigo para a Gazeta de Matemática.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] J. Leite Lopes, *A Estrutura Quântica da Matéria*, 2ª ed., Editora UFRJ, 1993.
- [2] *Einstein's miraculous year: five papers that changed the face of physics*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1998.
- [3] Albert Einstein, *Como Vejo o Mundo*, 4ª ed., Editora Nova Fronteira, 1981.
- [4] J. D. Jackson, *Eletrodinâmica Clássica*, 2ª ed., Editora Guanabara Dois, 1983.
- [5] Stephen Hawking, *O Universo numa Casca de Noz*, Editora Mandarim, 2001.
- [6] Hélio T. Coelho, M. R. Robilotta, *Forças Nucleares*, Ciência Hoje, vol. 11, nº 63 (1990) 22.
- [7] Marcelo Gleiser, *O Deus de Einstein*, Folha de São Paulo de 10/04/2005.
- [8] Marcelo Gleiser, *A Dança do Universo*, Editora Cia. das Letras, 1997.
- [9] Ildeu de Castro Moreira, Antônio Augusto Passos Videira (Organizadores), *Einstein e o Brasil*, Editora UFRJ, 1995.
- [10] A. Einstein, *Observações sobre a situação atual da teoria da luz*, Revista Hoje, Anais da Academia Brasileira de Ciências, 1 (1926) 1.