



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)

## As “Experiências de Pensamento” em Física: 3) Einstein.

Neste verbete, vamos descrever as “Experiências de Pensamento” usadas pelo físico germano-suíço-alemão Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) ao desenvolver as Teorias da Relatividade Restrita (TRR) e da Geral (TRG). Essas “experiências” decorrem da primeira que teve quando, em 1895, aos dezesseis anos de idade, pensou o que ocorreria “se viajasse ao lado da velocidade da luz no vácuo”. Para esse verbete, usarei os seguintes livros: Lincoln Barnett, **O Universo e o Dr. Einstein** (Melhoramentos, 1964; Cássio Leite Vieira, **Einstein: O Reformulador do Universo** (Odysseus, 2003); Walter Isaacson, **Einstein: Sua Vida, Seu Universo** (Companhia das Letras, 2007). Iniciemos pela TRR. Em verbetes desta série, vimos que o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) inicia seu famoso livro **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica** (“Princípios Matemáticos de Filosofia Natural”) (Nova Estella/EDUSP, 1990), publicado em 1687, com uma série de definições e, dentre elas, destacam-se: - *O tempo absoluto, verdadeiro e matemático foi sempre igual por si mesmo e por sua natureza, sem relação com qualquer coisa externa*; - *O espaço absoluto, por sua natureza, sem nenhuma relação com algo externo, permanece sempre semelhante e imóvel*. Tais definições mostram o **caráter absoluto da simultaneidade**, isto é, eventos que ocorrem no mesmo instante, mesmo que estejam espacialmente separados, não dependem da posição do observador. Pois bem, a **relatividade da simultaneidade** foi obtida, independentemente, em dois trabalhos relacionados com o eletromagnetismo, desenvolvido pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), em seu célebre livro intitulado **A Treatise on Electricity and Magnetism** (“Um Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo”) (Dover Publications, Inc., 1954), publicado em 1873, no qual ele apresenta suas quatro equações diferenciais – as famosas **Equações de Maxwell** (EM) – que dão a representação matemática das leis do eletromagnetismo em um meio material (em notação vetorial atual): 1)  $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ , onde  $\mathbf{E}$  (= ) é o **vetor deslocamento**,  $\mathbf{E}$  é o **vetor campo elétrico**,  $\epsilon_0$  é a **constante dielétrica** do meio considerado, e  $\rho$  é a **densidade de carga elétrica**; 2)  $\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}}$ , onde  $\mathbf{B}$  (= ) é o **vetor indução magnética**,  $\mathbf{B}$  é o **vetor campo magnético** e  $\dot{\mathbf{B}}$  é a **permissividade magnética** do meio; 3)  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \dot{\mathbf{D}}$ ; 4)  $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ , onde  $\mathbf{j}$  (= ) representa a **densidade de corrente de condução** e  $\mathbf{H}$  é a **condutividade elétrica**. Note que nessas EM,  $\nabla \cdot$ ,  $\nabla \times$ ,  $\dot{\mathbf{B}}$  e  $\frac{\partial}{\partial t}$  representam, respectivamente, os operadores: divergência, rotacional e derivada parcial no tempo. [José Maria Filardo Bassalo, **Eletrodinâmica Clássica** (Livraria da Física, 2007)].

O primeiro dos trabalhos referidos acima foi o do físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902), em 1904 (*Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam* **6**, p. 809), quando ele trabalhava no sentido de obter uma Teoria Eletrodinâmica do Elétron, tomando como hipótese a contração que o elétron, supostamente esférico, sofria na direção de seu próprio movimento. Nesse trabalho, ele chegou às hoje famosas

**transformações de Lorentz** (TL) [nome cunhado pelo físico, matemático e filósofo francês Jules Henri Poincaré (1854-1912), em 1905 (*Comptes Rendus Hebbdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* **140**, p. 1504)], dadas por:

$$x' = (x + V t); \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = (t + V x/c^2), \quad [\gamma = (1 - V^2/c^2)^{1/2}]$$

onde:  $(x', y', z')$  representam as coordenadas de uma partícula em relação a um referencial cuja origem situa-se em um observador fixo  $O'$ ;  $(x, y, z)$  são as coordenadas dessa mesma partícula em relação a um outro referencial cuja origem situa-se em um observador  $O$  que se desloca com uma velocidade  $V$  constante em relação a  $O'$ , e na direção do eixo dos  $x$  ( $x'$ ),  $t$  ( $t'$ ) representam os tempos marcados nesses dois referenciais, e  $c$  a velocidade da luz no vácuo. A transformação relacionando  $t'$  e  $t$  (terceira igualdade acima) mostra claramente que a **simultaneidade é relativa**. É oportuno esclarecer que Lorentz não se apercebeu desse resultado, uma vez que estava interessado em demonstrar que a massa do elétron apresentava duas componentes: uma longitudinal ( $m_{\parallel}$ ) (na direção de seu movimento) e uma transversal ( $m_{\perp}$ ), que era um assunto polêmico na época. [James Thomas Cushing, *American Journal of Physics* **49**, p. 1133 (1981)].

O segundo resultado sobre a **relatividade da simultaneidade** foi alcançado pelo físico germano-suíço-alemão Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), em 1905 (*Annalen der Physik* **17**, p. 891). Contudo, diferentemente de Lorentz, Einstein tomou as EM e investigou sua assimetria (não invariância), isto é, elas não apresentam a mesma forma quando se aplica nelas, as **transformações de Galileu** (TG) (que decorrem das TL quando se faz  $c \rightarrow \infty$ ):  $x' = x + V t$ ;  $y' = y$ ;  $z' = z$ ;  $t' = t$ . Ao examinar essa assimetria, Einstein escreveu: - *Os fenômenos eletromagnéticos, diferentemente dos mecânicos, não possuem propriedades correspondentes à ideia de repouso absoluto*. Além disso, Einstein usou duas hipóteses, conhecidas como **Princípios**: 1) **Princípio da Relatividade** – *As leis que regem os fenômenos físicos devem ser as mesmas para todos os referenciais inerciais em movimento relativo*, 2) **Princípio da Constância da Velocidade da Luz no Vácuo** ( $c$ ) – *A velocidade  $c$  não depende das fontes emissora ou receptora*. Note-se que Einstein começa esse seu seminal artigo [John Stachel (Organizador), **O Ano Miraculoso de Einstein: Cinco Artigos que Mudaram a Face da Física** (EdUFRJ, 2001)] examinando a definição de **simultaneidade newtoniana** ( $t' = t$ ) e, logo adiante demonstra que não se pode atribuir qualquer caráter absoluto para a **simultaneidade**, ou, em suas próprias palavras: - *Assim vemos que não podemos atribuir qualquer significação absoluta (grifo dele) ao conceito de simultaneidade, pois que, se dois eventos são simultâneos quando vistos de um sistema de coordenadas, não mais o serão quando vistos de um outro sistema que esteja em movimento relativamente ao primeiro*. Logo no parágrafo seguinte, Einstein demonstrou as TL.

Para “visualizar” a **relatividade da simultaneidade**, Einstein usou uma “**Experiência de Pensamento**” e que foi por ele apresentada nos livros: **Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie** (“Os Fundamentos da Relatividade Geral”) (J. A. Barth, Leipzig, 1916) e **Über die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie, Gemeinverständlich** (“Sobre a Teoria Especial e Geral da Relatividade, uma Popular Exposição”) (Vieweg, Braunschweig, 1917). Vamos reproduzi-la, seguindo os livros citados (Barnett; Vieira; Isaacson) com adaptações. Seja um trem de dimensões bastante grandes a

se deslocar sobre trilhos retilíneos e bem longos, com a velocidade próxima à da luz no vácuo ( $c$ ). Em determinado instante, um observador A colocado no meio do trem emite dois feixes de luz que se dirigem, em sentidos contrários, para as portas colocadas nas extremidades do trem e que se abem, automaticamente, logo que são iluminadas. Para A, esses dois eventos – abertura das portas – são simultâneos, já que o mesmo se encontra no meio do trem. Por outro lado, outro observador B que se encontrasse na plataforma dos trilhos em frente ao observador A quando este emitiu os dois sinais luminosos, veria que esses eventos não são simultâneos. Vejamos a razão dessa discrepância. Segundo o **Princípio da Constância da Velocidade da Luz no Vácuo**, os sinais luminosos emitidos pelo observador A têm a mesma velocidade  $c$ , quer para ele próprio, quer para B. Conseqüentemente, a porta traseira do trem, que se aproxima de B, receberá primeiro o sinal luminoso do que a porta dianteira, que se afasta de B. Portanto, para B, a porta traseira se abrirá primeiro do que a porta dianteira e, desta maneira, os eventos correspondentes a abertura de portas, que eram simultâneos para A, não o serão mais para B. É oportuno salientar que Einstein, nessa “experiência mental”, considerou que a abertura das portas do trem se devia à queda simultânea de raios de uma tempestade nas referidas portas (Barnett, op. cit.; Isaacson, op. cit.). Por sua vez, o jornalista e historiador da ciência brasileiro Cássio Leite Vieira (n.1960) (a quem agradeço a leitura crítica deste verbete) em seu livro citado, “visualiza” essa “experiência pensada” usando a explosão de uma bomba (“inofensiva”) colocada no meio do trem e ao lado do observador A e explodida por feixes simultâneos de canetas-laser emitidos das portas. Pelo mesmo **Princípio da Constância da Velocidade da Luz no Vácuo** deduz-se que o observador B vê a explosão, em tempos diferentes (antes ou depois) de A, seja porque é provocada apenas pelo laser da porta traseira, seja porque é provocada somente quando os dois feixes de luz-laser atingirem a “bomba”.

Para concluir este verbete, vejamos as **“Experiências de Pensamento”** de Einstein para desenvolver a TRG e uma de suas conseqüências. Depois de formular a TRR, Einstein percebeu que havia duas grandes dificuldades nela. Primeira, ela se baseava em referenciais inerciais, aqueles que se movimentam sem aceleração, ou seja, com velocidade constante, e que não existem no mundo real. A segunda era a de que sua teoria não incluía a Teoria da Gravitação Newtoniana (TGN). Desse modo, seu próximo passo foi o de representar a gravitação newtoniana dentro da estrutura da TRR. O pensamento básico do ajuste da TGN com a TRR ocorreu a Einstein, em 1907, quando ele estava ainda trabalhando no *Escritório de Patentes*, em Berna, na Suíça. Segundo suas próprias palavras: - *Eu estava sentado numa cadeira no escritório de patentes de Berna, quando, de repente, um pensamento me ocorreu: uma pessoa em queda livre não sentirá seu próprio peso. Fiquei surpreso. Esse pensamento simples impressionou-me profundamente. Impeliu-me para uma teoria da gravitação.* [No livro de Isaacson (op. cit.), lê-se que Einstein teria visto a queda de um pintor do telhado de um prédio de apartamentos (por sorte sobre um monte de lixo e que o deixou ileso) que ficava próximo do Escritório de Patentes, segundo uma reportagem de um correspondente do *New York Times*, em Berlim, depois de uma entrevista que realizou com Einstein, em 02 de dezembro de 1919, e de quem ouvira essa “fantasiosa” história]. Note que o próprio Einstein afirmou que esse foi “o pensamento mais feliz da vida dele”. Então, naquele mesmo ano de 1907 (*Jahrbuch der Radioaktivität* **4**, p. 411; **5**, p. 98), Einstein publicou um artigo no qual discutiu, pela primeira vez, a equivalência entre a **massa inercial** ( $m_i$ ) e a **massa gravitacional** ( $m_G$ ), ou seja, que um campo de forças é equivalente a um

campo gravitacional, e traduzida pela expressão:  $m_I \equiv m_G$ . Note-se que esse Princípio da Equivalência (PE), foi postulado, em 1912, por Einstein (*Annales der Physik Leipzig* **38**, p. 355, 443, 1059) e, independentemente, pelo físico alemão Max Abraham (1875-1922) (*Annales der Physik Leipzig* **38**, p. 1056). [Bassalo & Caruso, **Einstein** (Livraria da Física, 2013)].

Agora, vejamos como Einstein “pensou” essa equivalência, lançando mão de um elevador (“elevador de Einstein”) e, para isso, adaptaremos o texto de Vieira (op. cit.) e o de Isaacson (op. cit.). Imaginemos um físico em um elevador parado na superfície da Terra, com os pés em uma balança e com uma bola na mão. Ele olha para a balança e vê que ela registra seu peso (digamos, 60 kg) e, no mesmo instante, ele deixa cair a bola que atinge o piso do elevador. Para explicar esses resultados, essa pessoa usa a TGN e diz: a indicação de meu peso e a caída da bola decorrem do “puxão gravitacional terrestre”. Agora, imaginemos que esse elevador é lançado ao espaço interestelar e, depois de estar em uma região em que os efeitos gravitacionais do sistema solar sejam desprezíveis e o sistema impulsor foi desligado, então, o físico, a balança e a bola estão em “gravidade zero” e, portanto, estão flutuando no espaço. De repente, o físico observa os mesmos efeitos que sentiu quando estava no elevador parado na superfície da Terra. Agora, no entanto, o físico será incapaz de saber se o sistema impulsor voltou a acelerá-lo com uma força decorrente de uma aceleração constante de  $\sim 9,8 \text{ m/s}^2$  ou se foi atraído por alguma “Terra”, isto é, o físico é incapaz de distinguir um “campo de forças” de um “campo gravitacional”.

Agora, vejamos a “**Experiência de Pensamento**” decorrente de um dos efeitos do PE como, por exemplo, o “encurvamento da luz” ao passar por um campo gravitacional, conforme Einstein havia concluído em 1911 (*Annales der Physik Leipzig* **35**, p. 898). Para descrever essa “experiência pensada”, usaremos uma adaptação do texto de Barnett (op. cit.) e o de Isaacson (op. cit.). Continuemos com o “elevador de Einstein”, agora com um furo em uma das paredes, caminhando em uma região com aceleração constante. Em determinado instante, um viajante estelar envia um raio luminoso pelo furo e perpendicular às paredes do “elevador”. Como a velocidade de luz é finita ( $c$ ), o sinal leva certo tempo para atravessar o vão do “elevador” e, portanto, atinge a parede oposta um pouco mais próximo do piso. Se um observador em seu interior traçar a trajetória desse raio luminoso, verá que ela apresenta a forma de uma parábola. Esse observador, conhecedor da TGN e das TRR e TRG, explicará essa trajetória da seguinte maneira. Ora, como a luz tem massa inercial  $m_I$  (em virtude da relação einsteiniana:  $E = m_I c^2$ , decorrente da TRR) e considerando que no lançamento horizontal newtoniano de um corpo de massa  $m_G$  em um campo gravitacional sua trajetória é parabólica, ele concluirá que a luz foi atraída pelo campo gravitacional que o “elevador de Einstein” estava sujeito, conclusão essa decorrente do PE ( $m_I \equiv m_G$ ).



**ANTERIOR**

**SEGUINTE**