CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo
www.bassalo.com.br

A Relatividade do Movimento.

A relatividade do movimento, ou seja, a observação do movimento de um corpo em relação a um outro (parado ou em movimento), também conhecida como *composição de velocidades*, foi inicialmente discutida pelos matemáticos ingleses Leonard Digges (c.1520-c.1559) e seu filho Thomas Digges (c.1546-c.1595). Com efeito, no livro intitulado Prognostication of Right Good Effect ("Prognóstico de Efeito Verdadeiramente Correto") escrito por Leonard, em 1555, e em sua nova edição, agora com o título Prognostication Everlasting ("Prognóstico Eterno"), preparada por Thomas, em 1576, há a afirmação de que se uma pessoa se colocasse no extremo do mastro de um navio e jogasse um corpo no pé desse mastro ou para um ponto qualquer do tombadilho do navio, tal corpo seguiria uma trajetória reta na direção do alvo escolhido, qualquer que fosse a velocidade constante do navio. Contudo, parece que os Digges não realizaram nenhuma experiência desse tipo e sim, a tomaram como uma verdade evidente em si própria. [Alexandre Koyré, Estudos de História do Pensamento Científico Forense-Universitária/EDUnB, 1982); Colin A. Ronan, História Ilustrada da Ciência III (Jorge Zahar Editor, 1987)].

O filósofo e astrônomo italiano Giordano Bruno (1548-1600) se preocupou em descrever o movimento relativo de corpos ao propor experiências que poderiam ser realizadas a bordo de um navio em movimento. Assim, além de repetir a afirmação dos Digges, vista acima, ele propôs um novo tipo de experiência. Sejam duas pessoas, admitiu Giordano Bruno, uma no navio e a outra na margem de um rio. Então, quando estiverem uma defronte da outra, deixam cair uma pedra da mesma altura, e em queda livre. Cada pessoa, em particular, verá cair sua pedra ao pé da vertical, numa trajetória retilínea. No entanto, a trajetória descrita pela pedra lançada por uma dessas pessoas, vista pela outra, será uma curva. Por exemplo, a pessoa do navio verá a pedra lançada pela que está na margem cair em direção à popa do navio.

Sobre a queda de corpos do alto do mastro de um navio, estudada por Bruno, é interessante anotar que o astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642) escreveu, em 1624, uma carta ao seu amigo Francesco Ingoli (1578-1649) na qual afirmou que uma pedra que cai do alto de um mastro de um navio (imóvel ou em movimento) sempre cai ao pé do mastro. Observe-se, também que, por volta de 1625, o engenheiro francês Jean Gallé, a bordo de uma galera veneziana, no Mar Adriático, deixou cair uma massa de chumbo (Pb) do alto de seu grande mastro e observou, então, que a mesma não caiu ao seu pé, mas desviou-se em relação à popa da galera. Por fim, em 1634, o físico francês Jean Baptiste Morin (1583-1656) realizou uma experiência no Rio Sena, na qual deixou cair um corpo pesado do alto do mastro de um navio em movimento. Ao observar que o corpo caiu no pé do mastro, explicou aristotelicamente esse resultado afirmando que a pessoa que segurou o corpo no alto do mastro imprimiu-lhe um movimento próprio para frente, razão pela qual o corpo, ao cair, atingiu a base do mastro. (Koyré, op. cit.).

Voltemos a Galileu e seus trabalhos sobre o movimento. Em 1613, publicou o livro Istoria e Dimostrazione Intorno alle Machie Solarie ("História e Demonstrações sobre as Manchas Solares") e nele voltou a tratar do *movimento neutro* [e sua principal consequência – a ideia de inércia (ver verbete nesta série)] que havia proposto em seu estudo sobre o movimento, realizado entre 1589 e 1592. Nesse livro afirmou que: -

***Se todos os impedimentos internos são removidos, um corpo pesado sobre uma superfície esférica concêntrica com a Terra será indiferente ao repouso ou ao movimento para qualquer parte do horizonte. E ele permanecerá no estado em que pela primeira vez for colocado; isto é, se for colocado em movimento para oeste, por exemplo, ele manter-se-á nesse movimento*.**

Em 1632, em seu livro intitulado Dialogo supra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano ("Diálogo sobre os dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano") (publicado pela Discurso Editorial/FAPESP, 2001), Galileu retomou a questão sobre a queda de um corpo

em um navio parado ou em movimento, bem como discutiu a queda de um corpo do alto de uma torre, o movimento de projéteis e o voo das aves em uma Terra em movimento. Em toda essa discussão, Galileu usou o princípio da relatividade do movimento para refutar os argumentos aristotélicos sobre o movimento de nosso planeta. Registre-se que esse princípio é hoje conhecido como Relatividade de Galileu (RG) (ou *Transformação de Galileu*), e é formulado pela expressão:

$$x' = x + V t; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t\,,$$

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´), e t (t´) representam os tempos marcados nesses dois referenciais. É oportuno registrar que se a partícula se desloca com uma velocidade constante (v: v_x, v_y, v_z), então a RG nos mostra que (lembrar que velocidade = espaço/tempo):

$$v_x' = v_x + V; \quad v_y' = v_y; \quad v_z' = v_z\,,$$

que é a famosa Lei de Composição de Velocidades de Galileu.

Usando a RG e mais argumentos lógicos diretos, Galileu mostrou que era impossível determinar se um navio está ancorado ou em movimento retilíneo uniforme, realizando uma experiência mecânica em algum de seus camarotes sem vista para o exterior. Ainda nesse livro, Galileu discutiu experiências idealizadas (lógicas) sobre o movimento ascendente e descendente de corpos em planos inclinados, relacionados com o trabalho sobre o *impetus* ("inércia") que havia realizado em 1613. Sobre a rotação da Terra, Galileu refutou o argumento principal dos aristotélicos, qual seja, de que se a Terra girasse em torno de seu centro, os corpos não poderiam ficar em cima da mesma, pois seriam lançados para fora (isto é, haveria extrusão); a própria Terra seria despedaçada, acrescentavam os aristotélicos. Em seu argumento, Galileu afirmou que quando um corpo é lançado horizontalmente a partir de um ponto da superfície terrestre, ele tem um *impetus* para se mover segundo a tangente, mas tem ao mesmo tempo a tendência de se desviar para baixo, por causa da gravidade. E esse desvio, por menor que seja, basta para reter o corpo na superfície terrestre, concluiu Galileu. Para justificar essa conclusão, Galileu apresentou argumentos geométricos nos quais comparou a distância percorrida pelo corpo na tangente à superfície terrestre e a percorrida em queda devido à ação da gravidade, e observou que esta última é muito maior que a primeira. No entanto, devido à insuficiência de seus argumentos geométricos, não soube precisar o quanto. Registre-se que, em 1636, no livro intitulado Harmonie Universalle ("Harmonia Universal"), o padre franciscano francês Marin Mersenne (1588-1648) mostrou que Galileu havia cometido um erro de interpretação em sua explicação sobre o movimento de rotação da Terra. Com cálculos bastante simples, porém também equivocados, Mersenne mostrou que haveria extrusão dos objetos quando a Terra girasse mais rapidamente, do que a considerada por Galileu. (Koyré, op. cit.).

É interessante registrar que, em 1638, o filósofo e matemático francês René du Perron Descartes (1596-1650) publicou o livro La Dioptrique ("A Dióptrica"), no qual apresentou um estudo sobre a balística e, para tal, usou o princípio da relatividade do movimento que havia encontrado, independentemente, de Giordano Bruno e de Galileu. Logo depois, em 1639, o matemático francês Gilles Personne de Roberval (1602-1675) ensinou aquele princípio em suas aulas no *Collège de France*. Em 1642, o físico francês Pierre Gassendi (1592-1655) realizou experiências em Marselha [sob o patrocínio de Louis Vallois, Conde de Allais (1596-1653)], com as quais estudou a queda de um corpo do alto de uma galera em movimento. Para explicar a observação de que o corpo caía no pé do mastro, usou o princípio da relatividade do movimento de Bruno-Galileu-Descartes.

É também oportuno ressaltar que Descartes publicou, em 1644, o livro Principia Philosophiae ("Princípios Filosóficos"), no qual apresentou suas pesquisas sobre o movimento dos corpos, principalmente o efeito de uma força atuando em um corpo, considerando-o como a sua *quantidade de movimento*. Como resultado dessas pesquisas, afirmou que:

1) *Cada coisa persevera no estado em que está, enquanto nada muda*;

2) *Nenhuma coisa muda senão pelo encontro de outras*;

3) *Deus criou a quantidade de movimento inicial do Universo e, a partir de então, ela permanece sempre conservada, gerando dessa maneira, as leis da natureza*.

Conforme vimos em verbetes desta série, examinando essas afirmações cartesianas, vê-se que as duas primeiras relacionam-se com o conceito de inércia galileano e que foi formalizado pelo físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) em seu famoso livro Philosophiae Naturalis Principia Mathematica ("Princípios Matemáticos da Filosofia Natural") (editado pela Nova Stella/EDUSP, 1990), publicado em 1687, como sua Primeira Lei da Mecânica (hoje, *Primeira Lei de Newton* ou *Lei da Inércia*):

***Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele*.**

Ainda nesse livro, Newton define a quantidade de movimento cartesiana, como: - *É a medida do mesmo (movimento), obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria* (hoje, *momento linear*: p = mv), assim como apresenta sua Segunda Lei da Mecânica (hoje, *Segunda Lei de Newton* ou *Lei da Força*):

***A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida*.**

A terceira afirmação cartesiana foi apresentada pelo matemático suíço Leonard Euler (1707-1783), em 1750, como o *princípio do balanço do momento linear*. Muito embora ele tenha concebido esse princípio com uma extensão da *Segunda Lei de Newton*, e segundo o qual a aceleração de cada parte infinitesimal de qualquer corpo é igual à força por unidade de massa que atua no mesmo. Tal princípio, ainda segundo Euler, deve aplicar-se a sistemas mecânicos discretos e contínuos, já que sua formulação em termos de equações diferenciais permite sua aplicação a qualquer configuração de corpos no espaço tridimensional. Em vista, em linguagem atual, a *Segunda Lei de Newton-Euler* é dada por:

$$\vec{F} = m\, d^2\vec{r}/dt^2 = m\, d\vec{v}/dt = m\,\vec{a},$$

onde m é massa de um corpo, $\vec{r}$ é o vetor posição, $\vec{v}$ é a velocidade, e $\vec{a}$, a sua aceleração. Note que, hoje, aquele princípio é considerado como o *princípio da conservação do momento linear*.

Na conclusão deste verbete, é oportuno registrar que a relatividade do movimento tem uma outra interpretação. Vejamos qual. Em 1904 (*Koniklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam* 6, p. 809), o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1863-1938; PNF, 1902) pesquisou um modelo para estudar o movimento do elétron, no qual apresentou as hoje famosas transformações de Lorentz (TL):

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

onde, conforme vimos acima, (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. É fácil ver que, se c = ∞ ($\rightarrow \gamma$ = 1), essas TL se transformam nas *transformações de Galileu* (TG) [nome este cunhado pelo físico austríaco Philipp Frank (1884-1966), em 1909 (*Sitzungsberichte Berlin Akademie der Wissenschaften, Wien* 118, p. 373)]:

$$x' = x + V t;\quad y' = y;\quad z' = z;\quad t' = t.$$

É interessante destacar que, em 1905 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Sciences de l´Académie des Sciences de Paris* 140, p. 1504), o matemático e filósofo francês Jules Henri Poincaré (1854-1912) chegou às transformações de Lorentz (nome cunhado por ele nessa ocasião), ao estudar o eletromagnetismo maxwelliano (1873) e a gravitação newtoniana (1687). Sobre essas duas teorias ver verbetes nesta série.

Ainda em 1905 (*Annalen der Physik* 17, p. 891), o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) publicou seu famoso trabalho intitulado Elektrodynamik bewegter

Körper ("Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento"), no qual desenvolveu a hoje famosa Relatividade Restrita de Einstein, baseada nos seguintes princípios:

1) As Leis da Física são Invariantes por uma Transformação de Lorentz;

2) *A velocidade da luz no vácuo* (c) *é uma constante em qualquer sistema de referência*.

Usando esses dois princípios, Einstein demonstrou uma série de resultados revolucionários, dentre os quais destacamos (em notação atual): - 1) *Contração do Comprimento* - $L_0 = \gamma L$ -, onde L_0 é o comprimento de um bastão rígido que se desloca com uma velocidade V em relação a um observador em repouso, e L é o comprimento do bastão visto por esse observador; 2) *Dilatação do Tempo* - $d\tau = \gamma dt$ -, resultado esse que significa dizer que o intervalo de tempo (dt) entre dois eventos, medido numa série de relógios sincronizados e em repouso, é maior do que o intervalo de tempo ($d\tau$, *tempo próprio*) entre esses mesmos eventos, medido por um observador solidário a um relógio que se desloca com a velocidade V constante em relação ao conjunto de relógios sincronizados acima referido; 3) Composição de Velocidades de Einstein:

$$v_x' = (v_x + V)/(1 + v_xV/c^2); \quad v_y' = v_y/(1 + v_xV/c^2); \quad v_z' = v_z/(1 + v_xV/c^2) .$$

É fácil ver que essas expressões se transformam nas que representam a Composição de Velocidades de Galileu, vista acima, quando se faz c = ∞ ($\rightarrow \gamma$ = 1). É oportuno lembrar que, ainda em 1905 (*Annalen der Physik* 18, p. 639), Einstein demonstrou a célebre expressão: E = $m_0 \gamma c^2 = m c^2$, com m_0 representando a *massa de repouso*.

Em 1908 (*Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch-Physikalische Classe*, p. 53), o matemático alemão Hermann Minkowski (1864-1909) (professor de Einstein), demonstrou que as TL representam uma espécie de "rotação" em um espaço quadridimensional:

$$x_1 = x; \; x_2 = y; \; x_3 = z; \; x_4 = i\,c\,t.$$

Registre-se que, nesse *espaço minkowskiano*, a *velocidade* é a *aceleração* são representados pelos 4-vetores (v_μ, a_μ), definidos, respectivamente, por:

$$v_\mu = dr_\mu / d\tau \text{ e } a_\mu = d^2 r_\mu / d\tau^2, \; (\mu = 1, 2, 3, 4)$$

com r_μ ($\vec{r}$, ict) representando o *4-vetor posição* e $d\tau$, o *tempo próprio*. [H. A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski, H. Weyl and A. Sommerfeld, The Principle of Relativity (Dover Publications, Inc., 1952; Fundação Calouste Gulbenkian, 1978)].
