

Em busca do espaço absoluto



Albert Einstein criou duas teorias da relatividade. A primeira, publicada em 1905, denominada *teoria da relatividade especial* (TRE), ou *teoria da relatividade restrita*, trata da invariância das leis físicas sob uma transformação entre referenciais que se deslocam com velocidades relativas uniformes. Sua estrutura matemática é simples e pode ser dominada com a matemática estudada nos primeiros anos da universidade. Seus postulados físicos levam a resultados à primeira vista estranhos, mas que aceitamos como verdadeiros, porque obedecem a uma lógica implacável e são verificados por um número imenso de experiências. A segunda – a *teoria da relatividade geral* (TRG), publicada em 1916 – generaliza os resultados da primeira para referenciais acelerados e incorpora a gravitação. Essa teoria exige um bom conhecimento de geometria diferencial e cálculo tensorial e não será exposta neste texto – dela discutiremos brevemente apenas os fundamentos, para dar ao leitor uma ideia de seu conteúdo físico. Começaremos pela discussão do conceito de *referencial inercial*, essencial para a formulação da TRE.

1.1 REFERENCIAIS INERCIAIS

A mecânica clássica foi construída nos séculos XVI a XVIII por vários cientistas, mas seus fundamentos são devidos principalmente a Galileu Galilei e Isaac Newton. Coube a este dar-lhe a formulação definitiva em seus *Principia mathematica*⁽¹⁾. Ela tem como pressupostos as seguintes ideias:

1. O tempo é *absoluto, homogêneo e isotrópico*. Newton expressiu essa ideia assim: “O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa”. A ideia de *tempo absoluto* implica independência em relação ao observador e ao objeto ou fenômeno observados; ao dizer que “o tempo flui uniformemente”, Newton estava afirmando sua *homogeneidade*. Só na física quântica, a questão da *isotropia do tempo*, isto é, a equivalência ou não dos sentidos passado→futuro e futuro→passado, passou a ter significado e por isso a isotropia do tempo não é

mencionada por Newton. Na mecânica clássica, só há um sentido para o tempo, que é do passado para o futuro, mas, de qualquer forma, podemos verificar que suas leis são invariantes para uma inversão do tempo.

2. O espaço é *absoluto, homogêneo, isotrópico e euclidiano*. Nas palavras de Newton, “o espaço absoluto, por sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel”. A ideia de que o espaço não tem relação com qualquer coisa externa e que permanece imóvel corresponde a seu caráter de ser *absoluto*, a de que permanece sempre similar é uma afirmação de sua *homogeneidade*. Acrescentamos duas ideias, não declaradas por Newton, mas implícitas na mecânica clássica: a de equivalência de todas as direções – isotropia – e a de que a métrica a ser usada é a euclidiana: a distância mais curta entre dois pontos é a reta.

Como sabemos, Newton, com esses pressupostos, construiu a mecânica sobre três leis fundamentais:

Primeira: As partículas mantêm seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme (vetor velocidade constante) desde que forças externas não atuem sobre elas.

Segunda: A força que atua sobre uma partícula é igual ao produto da massa da partícula por sua aceleração:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}.$$

Terceira: Se uma partícula A exerce uma força \mathbf{F} sobre a partícula B , então B exerce a força $-\mathbf{F}$ sobre A .

De agora em diante, referiremo-nos a partículas sobre as quais não atuam forças como partículas livres. A primeira lei é a *lei de inércia*. Observem que a segunda lei não é uma simples definição de força, porque há leis independentes que permitem medir as forças, por exemplo, as leis de Hooke e de Coulomb. A afirmação de que o espaço é isotrópico corresponde dizer que a massa m na equação $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ independe da direção de \mathbf{a} , ou seja, que m é uma grandeza escalar. Se na terceira lei imaginarmos que as partículas A e B estão separadas, isto é, que existe ação à distância, então a ideia de simultaneidade absoluta – e portanto de tempo absoluto – está implícita.

Devido ao imenso êxito da mecânica clássica, a explicação do mundo físico desenvolvida nos séculos seguintes tomou-a como paradigma. Conforme esse paradigma, um fenômeno físico só é considerado completamente compreendido quando podemos construir um modelo mecânico para representá-lo. Além dos mesmos pressupostos básicos referentes ao espaço e ao tempo, adotou-se, como forma de qualquer lei física, a forma dinâmica das leis da mecânica; isto é, a forma em que o estado inicial de um sistema determina completamente o estado futuro por meio de uma equação diferencial. Essas ideias culminariam no século XIX com o determinismo de Laplace⁽²⁾. Vamos ver como a análise de dificuldades surgidas na física

no século XIX conduziram à reconsideração dos pressupostos expostos acima e à construção de uma nova teoria física, a *teoria da relatividade especial*. Para isso, vamos rever algumas ideias da física clássica, importantes para nossa análise.

Para estudar o movimento dos corpos, é necessário medir o tempo e a posição instantânea do corpo. Para registrar a posição de um corpo, é necessário introduzir um sistema de referência – *referencial* –, por exemplo, um sistema de coordenadas cartesianas. Qualquer conjunto de corpos em repouso relativo (cada um em relação aos outros) pode ser utilizado como referencial. Devido à homogeneidade e isotropia do espaço, a origem e orientação dos eixos é arbitrária. A métrica adotada deve ser euclidiana, isto é, nesse espaço, o teorema de Pitágoras é válido. Qualquer fenômeno periódico pode ser adotado como relógio, isto é, pode ser utilizado para medir o tempo e, devido à homogeneidade deste, a origem pode ser escolhida arbitrariamente; no entanto, como apontamos antes, o sentido será sempre do passado para o futuro.

Há, porém, um tipo particular de sistema de referência no qual a lei de inércia de Newton é válida e que é, por isso, denominado *referencial inercial*. Em outras palavras, se um corpo, sobre o qual não atuam forças externas, está em repouso ou em movimento retilíneo uniforme num referencial, ele é definido como inercial. Essa afirmativa não é, porém, estritamente, uma definição.

A escolha de um referencial inercial não é trivial. P. W. Bridgman, que deixou importantes contribuições sobre os fundamentos da física, propôs a regra seguinte para identificá-los: “um sistema de três eixos rígidos ortogonais constitui um referencial inercial se três partículas, sobre as quais não atuam forças, projetadas ao longo deles com velocidades uniformes, continuam a se mover com velocidades uniformes”. Essa regra, de difícil aplicação prática, é, de fato, uma definição operacional de referencial inercial por meio de uma *experiência imaginária*⁽³⁾.

Pode-se verificar empiricamente que um referencial ligado às estrelas é, com alta precisão, um referencial inercial e esse tipo de referencial é tomado tradicionalmente como padrão para aplicação das leis de Newton. Sabemos, no entanto, que essas estrelas não são realmente fixas, porque nossa galáxia gira em torno de seu eixo e o universo se expande. Então é mais apropriado considerar como padrão o referencial ligado às galáxias, que se afastam radialmente de nós.

Será um laboratório fixo na Terra um bom referencial inercial? Que correção devemos fazer na equação $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ para levar em conta a aceleração devida ao movimento do referencial?

Temos de considerar pelo menos o movimento diário da Terra em torno de seu eixo e o anual em torno do Sol, que são os mais significativos. Consideremos inicialmente o movimento diário da Terra. Uma partícula em repouso no equador sofre uma aceleração centrípeta

$$a = \frac{v^2}{R_T} = \omega^2 R_T = \left(\frac{2\pi}{8,6 \cdot 10^4} \right)^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cong 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2},$$

onde R_T é o raio da Terra e v a velocidade de um ponto no equador devido à rotação diária. Uma partícula próxima à superfície da Terra tem no referencial terrestre a aceleração $g = 9,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, devido à gravidade, valor que é afetado no terceiro algarismo significativo pela aceleração centrípeta calculada acima.

O leitor poderá fazer, de maneira análoga, o cálculo da aceleração que resulta do movimento anual da Terra em sua órbita solar e achará o valor $\sim 6\cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, que é uma ordem de grandeza menor do que o efeito do movimento diário e poderá, então, ser desprezado em comparação com esse. O efeito devido ao movimento do Sol, que arrasta a Terra, é menor ainda. Concluimos que o laboratório fixo na Terra pode ser considerado como inercial até esse grau de precisão; mas que se quisermos uma precisão maior deveremos adotar os referenciais ligados às estrelas ou às galáxias, mencionados atrás.

1.2 PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE DE GALILEU

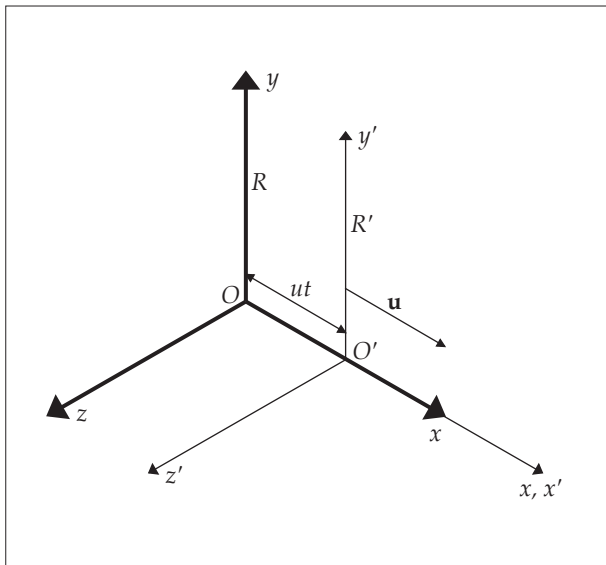


Figura 1.1
O referencial inercial R' move-se ao longo do eixo x do referencial inercial R com velocidade uniforme u . Um evento no referencial R é definido pelo conjunto de coordenadas (x, y, z, t) . O tempo é absoluto e, portanto, o mesmo para os dois referenciais.

O problema que se coloca para nós é o seguinte: dada uma lei física em um certo referencial, qual será sua forma em outro referencial, isto é, como ela se transforma ao passarmos de um referencial para outro? Se ela conserva a mesma forma, dizemos que é *invariante* sob a transformação.

A transformação de um referencial para outro na física clássica atende ao senso comum e sua dedução é imediata. Tomemos dois referenciais $R(x, y, z)$ e $R'(x', y', z')$ na configuração mostrada na Figura 1.1, que será a *configuração padrão* usada neste texto. Os eixos dos dois referenciais são paralelos e o referencial $R'(x', y', z')$ move-se na direção x com velocidade uniforme u em relação ao referencial R . No instante inicial, as origens coincidem. Observe que essa configuração não particulariza a solução porque, mesmo que o movimento se dê numa direção genérica, é

sempre possível girar os eixos do referencial R de modo que o eixo Ox coincida com a direção do movimento e, em seguida, girar o referencial R' para que seus eixos fiquem paralelos aos do referencial R .

Um fenômeno que ocorre no ponto do espaço (x, y, z) do referencial R , no instante t , tal como a colisão de duas partículas numa posição determinada e num momento determinado, é um *evento*. Por simplicidade, vamos nos referir ao conjunto de coordenadas (x, y, z, t) como um evento. No instante inicial, as coordenadas de um evento nos referenciais R e R' , definidos acima, são iguais ($x = x', y = y', z = z', t = t' = 0$), porque o tempo independe do referencial na física clássica e estamos supondo que as origens coincidam nesse instante.

No instante t , como R' se desloca com velocidade uniforme u na direção x , as coordenadas y' e z' do ponto não variam, $y = y'$ e $z = z'$, ao passo que a coordenada x

varia de acordo com a equação $x = x' + ut$. Se juntamos a essas equações a equação que exprime que o tempo é absoluto, isto é, independente do referencial, teremos a *transformação de Galileu* (TG):

$$x = x' + ut, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'. \quad (1.1)$$

A transformação de velocidades na mecânica clássica pode ser obtida imediatamente derivando essas equações em relação a $t = t'$:

$$u_x = u'_x + ut, \quad u_y = u'_y, \quad u_z = u'_z, \quad (1.2)$$

onde $(u_x, u_y, u_z) = (dx/dt, dy/dt, dz/dt)$ e $(u'_x, u'_y, u'_z) = (dx'/dt', dy'/dt', dz'/dt')$. Por exemplo, se um passageiro caminha com velocidade de $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ no convés de um navio que se desloca com velocidade de $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ em relação a uma bóia, a velocidade do passageiro em relação a essa mesma referência será de $(50 \pm 5) \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Dessa transformação de velocidades, podemos concluir que, dado um referencial inercial, qualquer referencial que se desloca com velocidade uniforme em relação a ele será também inercial, porque a lei de inércia é válida no novo referencial. Então, dado um referencial inercial, temos sempre *uma infinidade de referenciais inerciais*, que são todos os referenciais que se deslocam com velocidades uniformes em relação a ele.

Galileu verificou empiricamente que as leis da mecânica conservam sua forma quando transformadas de um referencial inercial para outro. Ele deu o seguinte exemplo: se fizermos experiências de mecânica na cabine fechada de um navio que se desloca com velocidade uniforme num lago muito tranquilo, não poderemos determinar, por meio dessas experiências, se o navio está em repouso ou em movimento. Esse resultado empírico é tomado como um princípio fundamental da física e recebeu o nome de *princípio da relatividade de Galileu* (PRG).

Vamos mostrar com um exemplo como uma lei da mecânica permanece invariante quando se passa de um referencial inercial para outro.

Exemplo 1.1

Um vagão se move com velocidade uniforme u em relação à plataforma da estação. Um passageiro deixa cair um objeto de uma altura h . O passageiro observa que o objeto, em sua queda, obedece à segunda lei de Newton. Mostre que, para um observador na plataforma, o objeto segue a mesma lei.

Solução

Tomamos o referencial R da plataforma, fixo na Terra, como inercial. O referencial R' do vagão, que se move com velocidade uniforme u em relação à plataforma, é também inercial. Fazemos os eixos dos dois referenciais paralelos e tomamos o eixo Ox como direção do movimento do vagão. Um ponto do espaço tem coordenadas (x, y, z) em R e (x', y', z') em R' . Como o vagão se move

na direção x , as coordenadas y e z permanecem inalteradas. O tempo, sendo absoluto, é o mesmo para os dois referenciais e admitimos que as origens dos referenciais coincidem no instante $t = 0$. Temos, pela TG:

$$x = x' + ut, \quad y = y', \quad z = z'$$

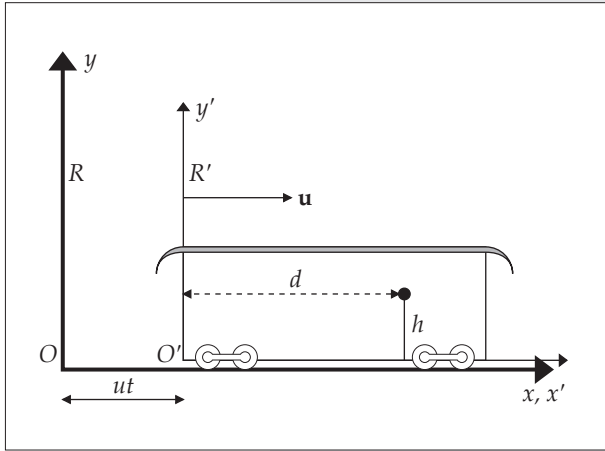


Figura 1.2

O referencial R é fixo na plataforma da estação e o referencial R' num vagão que se move com velocidade u na direção x . Um objeto cai da posição ($x' = d$, $y' = h$), dentro do vagão.

O observador no referencial R' vê o objeto cair na direção y' . Assim, as coordenadas z e z' são irrelevantes neste problema e podem ser ignoradas. As relações entre as componentes das velocidades \mathbf{v} e \mathbf{v}' do objeto nos dois referenciais são obtidas derivando-se em relação ao tempo as equações que ligam (x, y) e (x', y') dadas acima. Obtemos:

$$v_x = v'_x + u, \quad v_y = v'_y$$

Derivando essas equações novamente em relação ao tempo, obtemos as relações entre as componentes das acelerações:

$$a_x = a'_x, \quad a_y = a'_y$$

Então, a aceleração \mathbf{a} do objeto é invariante sob a TG. A força pode ser medida por processos independentes do sistema de coordenadas – por exemplo pela lei de Hooke – e não depende, portanto, do sistema de coordenadas; a massa é uma grandeza escalar e, por isso, independente do sistema de coordenadas. Como a massa, a força e a aceleração são invariantes, a equação de Newton, $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, é invariante sob a TG – os dois experimentadores, no vagão e na plataforma, observam que o objeto, em sua queda, obedece à mesma lei.

Observe que no referencial R' do vagão, onde o experimentador realiza a experiência,

$$x' = d, \\ y' = h - \frac{1}{2}gt'^2 = h - \frac{1}{2}gt^2$$

O objeto cai na vertical ($x' = d$), obedecendo à lei de queda livre ($y' = h - \frac{1}{2}gt^2$). O observador no vagão não pode, por essa experiência, dizer se está ou não em movimento porque o objeto obedece à mesma lei que obedeceria se o vagão estivesse parado na plataforma.

No referencial R da plataforma,

$$x = d + ut \\ y = h - \frac{1}{2}gt^2$$

e a trajetória do objeto é a parábola

$$y = h - \frac{g}{2u^2}(x - d)^2$$

A primeira lei de Newton é obviamente invariante sob a TG, porque é utilizada para definir o referencial inercial. A *massa* e a *força* são grandezas físicas independentes do referencial. Como a terceira lei de Newton só envolve o conceito de força, também ela é invariante sob a TG. A segunda lei envolve os conceitos de aceleração, massa, e força, todos três invariantes sob a TG e é, por isso, também invariante. As três leis de Newton são, portanto, invariantes sob a TG e como elas constituem os fundamentos da mecânica clássica, concluímos que todas as leis da mecânica são invariantes sob a TG. Esse é o conteúdo do PRG, que podemos formular assim: *as leis da mecânica são invariantes sob a TG*. O fato de não haver mudança na forma da lei quando o fenômeno é examinado em diferentes referenciais inerciais indica que um movimento uniforme não altera o fenômeno. Podemos então enunciar o PRG numa forma que salienta o conteúdo físico da lei: *é impossível detectar por meio de uma experiência mecânica o movimento de um referencial inercial*. Apesar de descoberto por Galileu no século XVII, esse princípio só recebeu o nome de *princípio da relatividade* no contexto da teoria da relatividade de Einstein.

O leitor deve observar que, quando transformamos uma equação qualquer da mecânica clássica de um referencial inercial para outro – o que devemos fazer utilizando as equações da TG –, sua forma permanece a mesma, isto é, o PRG é obedecido.

Concluímos que: *a mecânica de Newton, a transformação de Galileu e o princípio da relatividade de Galileu são consistentes*, isto é, formam um sistema de leis sem contradições internas.

Esse sistema permaneceu válido, com imenso sucesso, até o início do século XX e, com alguma restrição, que discutiremos depois, é utilizado até hoje. A quase totalidade da mecânica planetária e a mecânica de foguetes, satélites artificiais e corpos macroscópicos na Terra podem ser realizadas com esse sistema de leis. Apesar de críticas à mecânica de Newton terem surgido desde sua publicação, dificuldades realmente consideráveis só foram levantadas no fim do século XIX, quando se tentou achar um referencial absoluto para o eletromagnetismo.

1.3 ACELERAÇÃO ABSOLUTA E PRINCÍPIO DE MACH

Nunca faltaram críticas ao conceito de espaço absoluto de Newton. Desde Huygens, Leibniz e Berkeley, seus contemporâneos, até Mach⁽⁴⁾, no século XIX, e Einstein, no século XX, críticas argutas foram apresentadas ao conceito. Para Leibniz e Berkeley, o espaço não pode ser considerado como uma espécie de receptáculo ocupado pelos objetos da natureza. Na visão desses filósofos, o espaço nada mais é do que o conjunto de relações de posição entre os objetos materiais, percebidas pelos sentidos – a ausência de corpos materiais implicaria, portanto, inexistência do espaço.

Será possível determinar um movimento absoluto? Se nos referimos a movimento uniforme, o princípio da relatividade de Galileu dá uma resposta negativa a essa questão, porque não é possível escolher num conjunto infinito de referenciais inerciais o referencial do espaço absoluto. Newton acreditava, porém, que é possível determinar uma aceleração absoluta, por causa das forças fictícias que aparecem nos movimentos acelerados. Se isso fosse verdade, a ideia de espaço absoluto ganharia consistência.

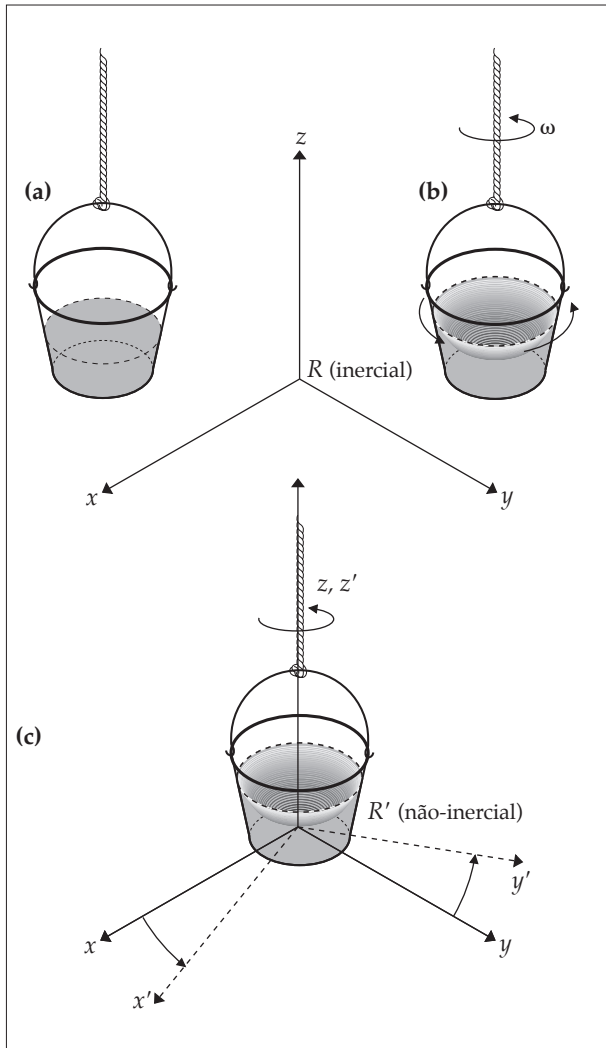


Figura 1.3
 Na experiência do balde, de Newton, o referencial R da Terra é tomado como (aproximadamente) inercial.
 (a) Balde em repouso no referencial R e observador em R .
 (b) Balde em rotação no referencial R e observador em R .
 (c) Balde em rotação em R e observador no referencial R' do balde.

Newton propôs a seguinte experiência: tomamos um balde com água suspenso por uma corda e o giramos várias vezes em torno de seu eixo, de modo a torcer a corda. Se soltarmos o balde, ele terá um movimento de rotação em torno do eixo. Inicialmente a superfície da água permanecerá plana [Figura 1.3(a)], mas o atrito da água com o balde comunicará o movimento do balde à água e sua superfície tomará uma forma côncava [Figura 1.3(b)]. De acordo com Newton, um observador no eixo do balde, girando com ele e, portanto, em repouso no referencial do balde [Figura 1.3 (c)], ao observar a forma côncava da superfície da água, poderá afirmar que o balde tem uma aceleração absoluta. Para Newton, as forças fictícias ou inerciais, que aparecem em um referencial R' em rotação uniforme (força centrífuga, força de Coriolis), que provocam a curvatura da superfície da água, resultam de rotações absolutas, isto é, de rotações em relação ao espaço absoluto.

No final do século XIX, Mach fez uma crítica aos fundamentos da mecânica de Newton que teve grande influência nas concepções de Einstein sobre a relatividade. Para Mach, só existem movimentos relativos; não importa se concebemos a Terra em rotação em torno de seu eixo, ou em repouso, enquanto as estrelas giram em torno dela. Na experiência do balde, segundo Mach, o que o observador está detectando de fato não é a aceleração do balde em relação ao espaço absoluto, mas, sim, em relação a todas as massas do universo, ou seja, em relação a um referencial ligado às estrelas – a concavidade seria observada igualmente se deixássemos

o balde fixo e fizéssemos o conjunto das estrelas girar em torno da Terra. De acordo com Mach, a lei de inércia não se refere ao repouso ou movimento uniforme, em relação ao espaço absoluto, mas em relação ao centro de massa de todas as massas do universo (referencial das estrelas). O que hoje denominamos *princípio de Mach* é uma conjetura que enfeixa o conjunto de ideias expostas acima, difícil de ser traduzida numa única proposição. A formulação de Einstein para essa conjetura é a seguinte: “A inércia mede a resistência de um ponto material à aceleração com respeito às massas de todos corpos do universo, sendo, portanto, afetada por elas”.

1.4 TEORIA ELETROMAGNÉTICA DE MAXWELL

Em meados do século XIX, Maxwell formulou uma teoria capaz de explicar todos os fenômenos elétricos e magnéticos conhecidos na época. Essa teoria está contida nas quatro equações para o campo elétrico \mathbf{E} e o campo magnético \mathbf{B} escritas a seguir em sua forma integral:

$$\begin{aligned}
 \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} &= \frac{q}{\epsilon_0} && \text{(lei de Gauss para o campo elétrico),} \\
 \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} &= 0 && \text{(lei de Gauss para o campo magnético),} \\
 \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= -\frac{d\varphi_E}{dt} && \text{(lei de Faraday),} \\
 \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} &= \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\varphi_E}{dt} && \text{(lei de Ampère-Maxwell),}
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

sendo $1/4\pi\epsilon_0 = 9 \cdot 10^9$ e $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, em unidades do SI; q , i , φ_E e φ_B são, respectivamente, carga elétrica, corrente elétrica, fluxo do campo magnético e fluxo do campo elétrico.

Nessas equações, está implícita a equação de continuidade para a carga q e a densidade de corrente \mathbf{j} :

$$\oint \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A} = -\frac{dq}{dt}$$

O leitor poderá recorrer a qualquer texto de eletromagnetismo para compreender o conteúdo físico dessas equações. As três primeiras e a quarta, com exceção do termo que contém φ_E , foram formuladas a partir de experiências. O segundo termo do segundo membro da quarta equação, que representa a chamada *corrente de deslocamento*, foi introduzido por Maxwell, num golpe de genial intuição, por simetria com a lei de Faraday. As equações de Maxwell tiveram extraordinário êxito na explicação dos fenômenos elétricos e magnéticos conhecidos na época e na previsão de novos fenômenos. Podemos dizer com Hertz que *a teoria de Maxwell é o sistema de equações de Maxwell*. A partir delas foi possível verificar que os fenômenos ópticos são fenômenos eletromagnéticos e, assim, unificar a óptica e o eletromagnetismo na mesma teoria.

É razoável perguntar-se: podemos estender o PRG às equações de Maxwell? Isto é, serão elas invariantes a uma TG? A resposta é negativa. Se aplicarmos a TG às equações de Maxwell, veremos que elas *não* são invariantes, como ilustraremos a seguir com um exemplo simples.

Consideremos duas cargas elétricas q_1 e q_2 em repouso no referencial inercial R , situadas como mostra a Figura 1.4(a). Um observador em R pode medir uma força eletrostática repulsiva \mathbf{F}_{el} atuando nas cargas. O referencial R' , com os eixos paralelos aos do referencial R , move-se com velocidade uniforme u ao longo de x e é também inercial. Um observador em R' [Figura 1.4 (b)] vê, no entanto, as cargas se moverem para a esquerda com velocidade u e, além da força eletrostática \mathbf{F}'_{el} , observa uma força magnética atrativa \mathbf{F}' entre elas, porque, para ele, agem como duas correntes elétricas no mesmo sentido.

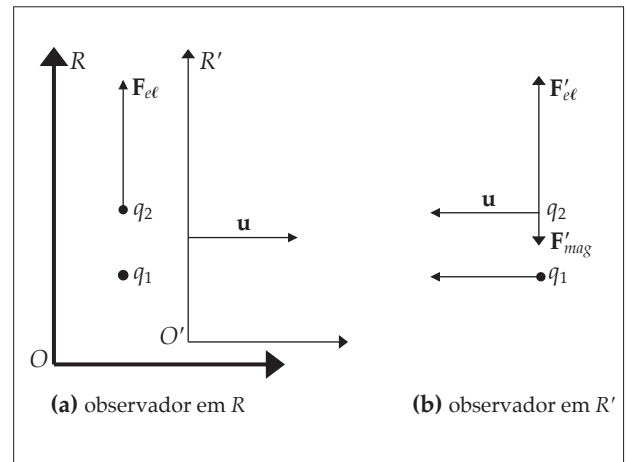


Figura 1.4 Observadores, em repouso nos referenciais inerciais R (a) e R' (b), analisam as forças que atuam entre as cargas elétricas q_1 e q_2 , em repouso no referencial inercial R .

Examinemos a transformação da lei de Gauss do referencial R para o referencial R' , quando aplicada à carga q_2 . Como a força independe do referencial, $\mathbf{F}_{el} = \mathbf{F}'_{el} + \mathbf{F}'_{mag}$. Mas \mathbf{F}'_{el} e \mathbf{F}'_{mag} têm sentidos opostos, então $|\mathbf{F}'_{el}| > |\mathbf{F}_{el}|$, ou $|q_2 \mathbf{E}'| > |q_2 \mathbf{E}|$. A carga elétrica é um escalar invariante à transformação entre referenciais; logo, $|\mathbf{E}'| > |\mathbf{E}|$ e $\oint \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{A} > \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$. Como q/ϵ_0 é invariante sob a TG, a lei de Gauss, $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = q/\epsilon_0$, não pode ser válida nos dois referenciais e não é invariante sob a TG.

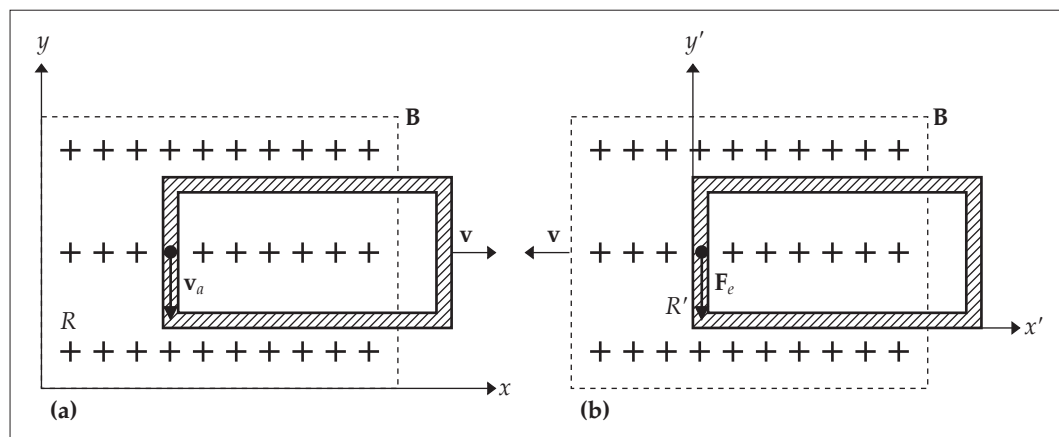
Além da não invariância das equações de Maxwell sob uma TG, há uma assimetria na explicação dos fenômenos eletromagnéticos quando analisados em diferentes referenciais inerciais. Considere, por exemplo, uma espira condutora que se desloca com velocidade \mathbf{v} para fora de uma região, onde há um campo magnético \mathbf{B} , perpendicular ao plano da espira [Figura 1.5(a)]. Para um observador em repouso em relação ao ímã que cria o campo magnético \mathbf{B} (referencial R), a força que atua sobre um elétron situado no centro do lado esquerdo da espira é $\mathbf{F} = e \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ dirigida para baixo. Do ponto de vista desse observador, a *força eletromotriz* (fem) na espira é de origem puramente magnética e dada por $\oint \mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$. Para um observador fixo no referencial R' da espira [Figura 1.5(b)], o ímã se desloca para a esquerda com velocidade $-\mathbf{v}$ e o elétron está em repouso. Ele observa, da mesma forma que o observador em R , que o elétron se desloca no sentido anti-horário na espira e mede a mesma fem. No entanto, dá uma explicação diferente à dada pelo observador em R – para o observador em R' atua no elétron um campo elétrico \mathbf{E} induzido na espira pelo movimento do ímã (lei de Faraday) e a fem é dada por $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$.

Dessa forma, os observadores explicam de maneira diferente a origem da fem, mas calculam o mesmo valor para ela. Essa assimetria, citada por Einstein na introdução de seu famoso artigo de 1905 sobre a teoria da relatividade, foi uma das dificuldades da física clássica que o levaram a propor a teoria.

Chegamos à conclusão de que: *a transformação de Galileu, o princípio da relatividade (estendido ao eletromagnetismo) e as equações de Maxwell são incompatíveis.*

Figura 1.5

(a) A espira se desloca com velocidade \mathbf{v} para fora de uma região onde há um campo magnético uniforme \mathbf{B} , perpendicular ao plano da espira.
(b) O ímã que cria o campo magnético \mathbf{B} move-se com velocidade \mathbf{v} para fora da espira.



Uma pequena reflexão colocará o leitor diante de três alternativas para resolver o conflito:

- a) O PR *não* pode ser estendido ao eletromagnetismo. Nesse caso, deve existir um referencial absoluto para o eletromagnetismo.
- b) O PR pode ser estendido ao eletromagnetismo; a mecânica de Newton e a TG são corretas. Nesse caso, a formulação do eletromagnetismo por Maxwell *não é correta* (porque não é invariante sob a TG) e exige modificação.
- c) O PR pode ser estendido ao eletromagnetismo e a teoria eletromagnética de Maxwell é correta. Nesse caso, a TG e a mecânica de Newton *não são corretas* e exigem modificações.

A escolha entre essas três opções só poderá ser feita por meio de experiências. Vamos examinar inicialmente a tentativa de Michelson e Morley de determinar o referencial absoluto (o *éter*), que poderia ou não eliminar a opção (a).

1.5 A VELOCIDADE DA LUZ

O leitor poderá ver em textos de eletromagnetismo que das equações de Maxwell (Equações 1.3) é possível deduzir a equação:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0 \quad (1.4)$$

onde f representa qualquer componente de \mathbf{E} ou \mathbf{B} . Comparando essa equação com a equação da mecânica clássica para uma onda que se propaga na direção x ,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0$$

vemos que ela pode ser interpretada como uma *equação de onda* para os campos \mathbf{E} e \mathbf{B} . Nessa última equação, u é a velocidade da onda, e podemos então concluir que a velocidade v da onda eletromagnética será dada por

$$v^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \quad (1.5)$$

O valor de v calculado da última relação, a partir das constantes μ_0 e ϵ_0 – que podem ser determinadas em experiências de laboratório envolvendo cargas e correntes –, é admiravelmente próximo do valor medido da velocidade da luz, o que levou Maxwell a sugerir que a luz seria uma onda eletromagnética e, então, de fato, $v \equiv c$. Dessa forma, as equações de Maxwell unificaram eletricidade, magnetismo e óptica e davam um enorme passo na direção da unidade da física. A existência de ondas eletromagnéticas só seria confirmada experimentalmente por Hertz vinte anos depois da publicação da teoria eletromagnética de Maxwell.

Vemos pelas Equações 1.4 e 1.5 que a velocidade da luz é parte integrante das equações de Maxwell. Na verdade, essas equações podem ser escritas escolhendo-se o sistema de unidades, de forma que a velocidade da luz apareça explicitamente nelas⁽⁵⁾ em lugar das constantes μ_0 e ϵ_0 . Coloca-se, então, na física clássica, uma importante questão: *em relação a que referencial devemos medir c* ? Isso, porque somente nesse referencial as equações de Maxwell estarão formalmente corretas. A resposta dada por Maxwell a essa pergunta foi que c deveria ser medida em relação ao *éter*, meio que seria o suporte para as ondas eletromagnéticas. Maxwell e os físicos de sua época não conseguiam imaginar um campo como uma entidade auto-suportável, capaz de propagar-se no vácuo e introduziram por isso o conceito de éter. Como deveria servir de suporte às *oscilações transversais* das ondas eletromagnéticas, o éter teria propriedades bem peculiares: preencher todo o espaço, inclusive os corpos materiais, estar em repouso em relação ao espaço absoluto, ser infinitamente elástico, não ter massa e, coroando todas essas propriedades, ser imperceptível. Pelo fato de estar o éter em repouso em relação ao espaço absoluto, seus referenciais são indistinguíveis, de forma que nos referiremos muitas vezes, no que se segue, aos referenciais dos dois sem distinção.

Se o éter está em repouso no espaço absoluto, é claro pela física clássica (TG) que, se medirmos a velocidade da luz num laboratório terrestre, nas duas condições – em que o movimento da Terra tem o mesmo sentido do feixe de luz e no sentido oposto –, teremos resultados diferentes. Para obter a velocidade *absoluta* da luz (velocidade em relação ao éter), levando em conta a TG, deveríamos somar ou subtrair a velocidade da Terra ao valor medido. Um resultado negativo dessa experiência – isto é, se forem medidos valores iguais para a velocidade da luz nas duas situações – indicaria que o éter é arrastado pela Terra em seu movimento.

No fim do século XIX, a determinação do movimento relativo da Terra e do éter, denominado *vento do éter*, tornara-se um dos problemas mais embaraçosos da física. A experiência de Michelson e Morley, que analisaremos a seguir, foi uma tentativa de resolvê-lo.

1.6 A EXPERIÊNCIA DE MICHELSON E MORLEY

Considere uma fonte de luz e um espelho situado à distância L da fonte e seja \mathbf{v} a velocidade orbital da Terra, paralela à direção do feixe de luz (Figura 1.6). O leitor poderá mostrar que a velocidade relacionada ao movimento rotacional diário da Terra é duas ordens de grandeza menor do que a velocidade orbital e pode ser desprezada no cálculo seguinte.

De acordo com a TG, o tempo gasto por um pulso de luz emitido pela fonte no percurso total de ida e volta ao espelho é

$$t = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} \cong \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right). \quad (1.6)$$

A aproximação feita no último membro da Equação 1.6 resulta da expansão binomial de

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$$

e é possível porque $v \ll c$. A velocidade orbital da Terra comparece no cálculo de t no termo v^2/c^2 ; como $v \cong 3 \cdot 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, então

$$\frac{v^2}{c^2} \cong \frac{9 \times 10^8}{9 \times 10^{16}} \cong 10^{-8}.$$

Michelson percebeu que essa precisão poderia ser alcançada com métodos interferométricos e projetou o interferômetro de elevada precisão representado esquematicamente na Figura 1.7.

O feixe de luz que parte da fonte F é dividido em dois pelo espelho semiprateado A . O feixe 1, que atravessa o espelho, é refletido no espelho B e, na volta, no espelho A , dirigindo-se para a ocular O . O feixe 2, refletido em A , é dirigido para o espelho C , onde é novamente refletido, atravessa o espelho A , prosseguindo na direção da ocular. Os dois feixes, percorrendo agora a mesma trajetória, recombina-se e formam na ocular O o padrão de interferência que é observado. A interferência resulta do fato de os dois feixes percorrerem caminhos ópticos diferentes. A diferença de caminhos ópticos pode ser calculada multiplicando-se a velocidade da luz c pela diferença dos tempos de percurso Δt . Só é preciso levar em conta o trajeto do feixe 1 entre A

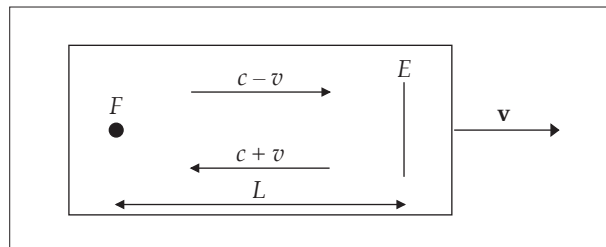


Figura 1.6

A fonte de luz F e o espelho E estão fixos na bancada que, estacionária na Terra, move-se em relação ao éter com a velocidade orbital v desta. De acordo com a física clássica, $c - v$ e $c + v$ são as velocidades do feixe de luz emitido e refletido, respectivamente, em relação ao laboratório.

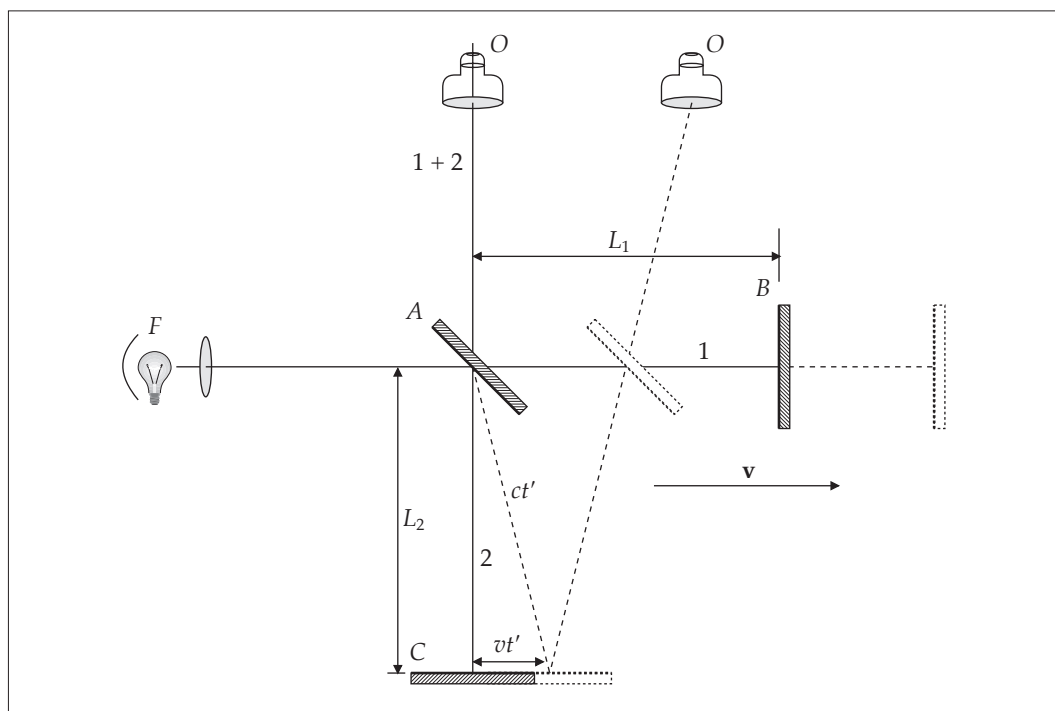


Figura 1.7

Espectrômetro de Michelson e Morley. A figura em linhas pontilhadas mostra o espectrômetro deslocado de sua posição original pelo movimento da Terra em relação ao espaço absoluto.

e B e o trajeto do feixe 2 entre A e C , porque os outros trechos coincidem. Sendo v a velocidade da Terra, o tempo de percurso do trajeto ABA pelo feixe 1 é dado por:

$$t_1 = \left(\frac{L_1}{c-v} \right) + \left(\frac{L_1}{c+v} \right) = \frac{2L_1}{c(1-\beta^2)} \quad \left(\beta = \frac{v}{c} \right)$$

Para achar o tempo de percurso do trajeto ACA pelo feixe 2 é preciso levar em conta a velocidade orbital v da Terra na direção perpendicular à da luz. No tempo t' que a luz leva para ir do espelho A ao espelho C , percorrendo a distância ct' , o espelho C avança a distância vt' . O trajeto da onda luminosa é representado na Figura 1.7 pela linha pontilhada. Portanto

$$c^2 t'^2 = v^2 t'^2 + L_2^2$$

e

$$t' = \frac{L_2}{\sqrt{c^2 - v^2}}.$$

O tempo de percurso do trecho ACA é, então:

$$t_2 = 2t' = \frac{2L_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L_2}{c\sqrt{1-\beta^2}}$$

Obtemos das expressões de t_1 e t_2 acima diferença de caminhos ópticos:

$$c\Delta t = c(t_1 - t_2) = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left(\frac{L_1}{\sqrt{1-\beta^2}} - L_2 \right) \quad (1.7)$$

O instrumento foi girado de 90° e a experiência repetida de forma que os dois feixes trocam de papéis: o feixe 1 é agora perpendicular ao movimento da Terra e o feixe 2 situa-se ao longo dele. Com a nova observação se obtém:

$$t'_1 = \frac{2L_1}{c\sqrt{1-\beta^2}}, \quad t'_2 = \frac{2L_2}{c(1-\beta^2)}$$

A nova diferença de caminhos ópticos será:

$$c\Delta t' = c(t'_1 - t'_2) = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left(L_1 - \frac{L_2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \quad (1.8)$$

A diferença entre as duas observações (Equações 1.7 e 1.8) será:

$$c(\Delta t - \Delta t') = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left(\frac{L_1 + L_2}{\sqrt{1-\beta^2}} - (L_1 + L_2) \right) \cong (L_1 + L_2)\beta^2, \quad (1.9)$$

onde fizemos a aproximação $(1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}} \cong 1 + \frac{1}{2}\beta^2$, possível, porque $v \ll c$.

Essa diferença (Equação 1.9) deveria produzir um deslocamento das franjas de interferência e é isso que Michelson tentou observar. Para um comprimento de onda λ da luz, o padrão é deslocado de ΔN franjas, sendo

$$\Delta N = \frac{c(\Delta t - \Delta t')}{\lambda} = \frac{2(L_1 + L_2)}{\lambda\sqrt{1-\beta^2}} \cong \frac{L_1 + L_2}{\lambda} \beta^2. \quad (1.10)$$

Com um espectrômetro como o utilizado por Michelson (experiência de 1881), com braços $L \cong 1$ m, o deslocamento da franja deveria ser da ordem de 0,04 de sua largura. Esse valor é muito pequeno, da ordem do erro experimental, mas, mesmo assim, permitiu a Michelson concluir que o resultado da medida era nulo, isto é, que não era possível perceber o movimento da Terra em relação ao éter.

Uma experiência mais precisa foi realizada por Michelson e Morley em 1887. Observe que o deslocamento das franjas é proporcional a L . Michelson e Morley aperfeiçoaram o aparelho, aumentando L dez vezes por meio de uma série de reflexões em espelhos colocados no caminho do feixe. Além disso, montaram o aparelho numa placa de pedra que flutuava num tanque de mercúrio, para diminuir as tensões mecânicas durante a rotação, que poderiam afetar as distâncias dos espelhos. Nessa nova experiência, o deslocamento das franjas de interferência, dado pela Equação 1.10, deveria ser da ordem de 0,4 da largura da franja. Os experimentadores julgavam que seriam capazes de detectar desvios de um centésimo da largura da franja, mas os deslocamentos observados correspondiam a uma pequena fração do valor calculado e não eram consistentes. Puderam, então, concluir que o movimento da Terra em relação ao éter não podia ser detectado⁽⁶⁾.

Seria possível imaginar que, acidentalmente, por uma combinação do movimento orbital da Terra com os movimentos do Sistema Solar e da Via Láctea, a componente do movimento a Terra na direção do feixe de luz fosse nulo. É claro, então, que, seis meses depois, a velocidade orbital da Terra teria o sentido invertido e seria, em relação ao éter, o dobro da velocidade orbital. Para anular esse possível acidente, a experiência foi realizada em diferentes horas do dia e em diferentes estações do ano, com resultados sempre nulos. Desde que Michelson e Morley realizaram suas experiências, elas foram repetidas várias vezes, com aperfeiçoamentos, por outros experimentadores, sempre com resultados nulos.

O resultado nulo da experiência constituiu um problema grave para a física clássica. Uma explicação possível seria o arrastamento do éter pela Terra. É claro que se o éter é arrastado pela Terra em seu movimento, o experimentador deverá achar um resultado nulo para a velocidade da Terra em relação a ele. Porém, o arrastamento do éter estava em contradição direta com duas experiências realizadas no passado e bem confirmadas, que discutiremos a seguir.

Problema 1 Supondo que, num espectrômetro de Michelson-Morley, utiliza-se luz amarela ($\lambda = 590$ nm) e que o braço do espectrômetro mede 1 m, calcule o deslocamento de franjas de interferência esperado, em relação à largura da franja, de acordo com a física clássica. A velocidade orbital da Terra é $v \approx 30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

1.7 ABERRAÇÃO DA LUZ DAS ESTRELAS E EXPERIÊNCIA DE FIZEAU

A primeira das experiências citadas na Seção 1.6 mostrando a impossibilidade do arrastamento do éter pela Terra é a observação da *aberração da luz das estrelas*.

O fenômeno da aberração da luz das estrelas foi descoberto por James Bradley, em 1725. Ao examinar a variação da posição aparente das estrelas durante o ano, ele observou que, após serem feitas todas as correções necessárias, uma estrela no zênite da eclíptica movia-se numa órbita quase circular com diâmetro de $40,5''$, o que obrigava a inclinar o telescópio num ângulo $\alpha \cong 20''$. Ele conseguiu explicar o fenômeno como resultado da combinação da velocidade da luz com a velocidade da Terra em seu movimento orbital, como mostraremos a seguir.

Seja R o referencial da estrela. Se a Terra estivesse fixa nesse referencial o telescópio deveria ser dirigido na direção do eixo y , isto é, $\alpha = 0$. Como a Terra se desloca com velocidade v em relação à estrela, precisamos introduzir o referencial R' da Terra. A velocidade do raio de luz no referencial R' resulta da composição da velocidade c do raio de luz da estrela com a velocidade v da Terra, ambas medidas em relação ao éter (referencial R), como mostra a Figura 1.8.

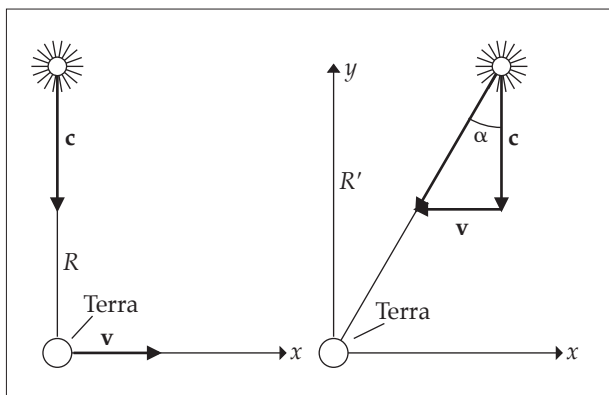


Figura 1.8
Experiência da aberração da luz das estrelas. A figura da esquerda mostra a observação da estrela no referencial desta e a da direita, no referencial da Terra. Neste último é necessário inclinar o telescópio num ângulo α em relação à vertical para compensar o movimento orbital da Terra.

O ângulo sob o qual se observa a estrela é dado por

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{c} = \frac{3 \cdot 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = 10^{-4},$$

$$\alpha \cong 10^{-4} \text{ rad} \cong 20'',$$

em excelente acordo com a observação.

Essa experiência nos mostra que o éter, que é estacionário no referencial R , não é arrastado pela Terra (referencial R'). Se fosse, não haveria aberração e o telescópio deveria ser direcionado na vertical.

A outra experiência mencionada é a *experiência de Fizeau-Fresnel* sobre o arrastamento do éter por um meio em movimento. Um tratamento rigoroso dessa teoria só pode ser feito com a teoria eletromagnética de Maxwell, por isso, exporemos aqui apenas os resultados. Segundo uma teoria de Fresnel, verificada experimentalmente por Fizeau, em 1853, a velocidade da luz v em um meio de índice de refração n , que se desloca com velocidade u em relação ao observador, é dada por

$$v = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)u, \quad (1.11)$$

tomando-se o sinal superior ou inferior se o movimento da luz é no mesmo sentido ou em sentido contrário ao movimento do meio, respectivamente.

No entanto, pela TG, se o éter fosse totalmente arrastado pelo meio, a velocidade da luz seria dada por $v = c/n \pm u$. A Equação 1.11 sugere que o éter é parcialmente

arrastado pelo meio em movimento. O fator $(1 - 1/n^2)$ é o *coeficiente de arrastamento de Fresnel*, que indica a fração da velocidade u do meio com que o éter é arrastado.

É claro que, do resultado dessa experiência, para um meio de índice de refração $n = 1$ (como o ar) em movimento, o coeficiente de arrastamento é 0, ou seja, o éter permanece *estacionário*. As experiências de Fresnel-Fizeau e da aberração das estrelas favorecem, portanto, a hipótese de que o éter não é arrastado pelos corpos materiais em movimento.

Para explicar o resultado nulo achado por Michelson e Morley e, ao mesmo tempo, manter o éter estacionário, FitzGerald e Lorentz⁽⁷⁾ propuseram que os corpos sofreriam uma contração na direção de seu movimento por um fator $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Com essa hipótese, o braço do espectrômetro de Michelson paralelo à velocidade da Terra se contrairia justamente o fator necessário para explicar o resultado nulo da experiência. Essa conjectura não resistiu a testes experimentais, que não discutiremos aqui, e logo perderia sua importância quando Einstein propôs sua teoria, capaz de explicar o resultado nulo da experiência de Michelson a partir de princípios muito gerais e de alcance mais amplo. Devemos concluir que a evidência experimental é em favor da inexistência de um referencial absoluto, mesmo que apenas localmente estacionário, como no caso do deslocamento do éter por um astro em movimento. Dos três caminhos listados antes para resolver o conflito apontado na física clássica, fica então eliminado o primeiro.

Problema 2 Mostre que a hipótese de FitzGerald-Lorentz explica o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley.

Sugestão: Reporte à Figura 1.7; suponha a velocidade da luz constante em relação ao éter e a dimensão do espectrômetro, ao longo do movimento, sofrendo contração por um fator $[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}$. Mostre que sinais de luz enviados pela fonte levam o mesmo tempo, no percurso de ida e volta, nas duas direções.

O segundo caminho exige uma modificação da teoria de Maxwell. As tentativas mais conhecidas são as *teorias de emissão*, em que a eletrodinâmica de Maxwell é modificada fazendo que a velocidade de uma onda luminosa esteja associada à fonte e não a um referencial absoluto. Postula-se que a velocidade da luz, num meio de índice de refração n , é c/n em relação à fonte emissora e independente do movimento do meio. O leitor poderá verificar que elas explicariam o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley. Essas teorias foram refutadas pelo exame da luz emitida por estrelas binárias eclipsantes (o par de estrelas gira em torno do centro de massa de forma que, para um observador na Terra, uma se afasta quando a outra se aproxima). É evidente que a velocidade da luz que atinge a Terra proveniente da estrela que se aproxima deveria ser maior do que a da companheira que se afasta, o que não foi verificado. A natureza deste texto não permite a exposição dessas teorias e das experiências que as refutaram. O imenso êxito da teoria de Maxwell na explicação dos fenômenos eletromagnéticos e ópticos nos levam a abandonar o segundo caminho sugerido.

Resta, dessa forma, o terceiro caminho, que estende o princípio da relatividade ao eletromagnetismo, mantém a teoria eletromagnética de Maxwell e procura corrigir a mecânica de Newton, para que essas teorias fiquem consistentes com o princípio da relatividade. Esse foi o caminho explorado por Einstein, e que exporemos nos próximos capítulos.

Notas

- (1) O tratado *Philosophiae naturalis principia mathematica*, cume da obra científica de Isaac Newton (1642-1727)*, foi publicado em 1687, na maturidade desse grande matemático e físico. Aos 25 anos, Newton já tinha realizado suas maiores descobertas: o cálculo diferencial e integral, a gravitação universal, a dispersão da luz e o telescópio de reflexão. Os *Principia*, que sistematizam pesquisas realizadas desde a juventude, criaram um paradigma que dominou as ciências físicas nos dois séculos seguintes e continuam a ser, até nossos dias, os fundamentos para cálculos de mecânica no mundo macroscópico. A obra ultrapassou os limites das ciências físicas, influenciando a filosofia e, em consequência, toda a cultura dos séculos XVIII e XIX. Newton dedicou ainda parte considerável de seu tempo a pesquisas em alquimia e cronologias bíblicas.

Muitas vezes somos tentados a separar a obra de Newton em uma parte boa e outra inútil. Não devemos, no entanto, tomar seus estudos das cronologias bíblicas e de alquimia de forma derrisória, mas no contexto da época e, sendo assim, como uma demonstração de sua tentativa de abarcar todo o conhecimento humano para compreender o universo. Newton era um homem profundamente religioso e até intolerante no que se relacionava à religião. Mesmo nos *Principia* pode-se perceber a manifestação de sua crença religiosa. Para Newton, Deus não cria o espaço – o espaço absoluto e eterno é parte integrante da existência da divindade. Deus percebe os corpos físicos por sua onipresença no espaço absoluto; é como se o espaço fosse o órgão de percepção de Deus. Ele também atua no mundo físico, corrigindo as perturbações mútuas nas órbitas dos planetas, evitando que elas venham a se desorganizar e causem colisões. Leibniz, contemporâneo e opositor de Newton em muitas questões, ironizava o talento do Deus newtoniano como relojoeiro, incapaz de construir um mecanismo à prova de perturbações.

Infelizmente, as características sociais de Newton não acompanhavam suas qualidades intelectuais. Provavelmente, sua vida afetiva foi prejudicada pela orfandade antes do nascimento, seguida pelo casamento da mãe com um homem por quem ele não desenvolveu nenhuma afeição. Não aceitava facilmente o sucesso de outros e gastou parte de sua vida em disputas inúteis a respeito de prioridades de descobertas científicas. Conservava ressentimentos por toda a vida. Teve poucos amigos, ainda assim, mais pela dedicação deles do que dele. Sua falta de humor era tal que um servidor da Universidade de Cambridge, contemporâneo, afirmava só tê-lo visto rir uma única vez em cinco anos! E mesmo dessa vez, por um motivo peculiar: Newton havia emprestado um volume da geometria de Euclides a um conhecido e este perguntou-lhe de que lhe valeria estudá-lo.

A mais completa biografia de Newton é a obra de Richard S. Westfall, *Never at rest: a biography of Isaac Newton*, da qual existe uma edição condensada pelo próprio autor, com tradução em português: Westfall, Richard S., *A vida de Isaac Newton*, Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1995. A pequena biografia: *Newton – a órbita da terra em um copo d'água*, Valadares, Eduardo C., São Paulo: Odysseus Editora, 2003, tem caráter pedagógico, com explicação de várias descobertas de Newton. Há ainda, com tradução em português, as biografias: *Isaac Newton, o último dos feiticeiros*, White, Michael,

Rio de Janeiro: Editora Record, 2000 e *Isaac Newton*, Gleick, James, São Paulo: Companhia das Letras, 2004. Há também a tradução de uma seleção de textos de Newton: *Newton. Textos, antecedentes, comentários*, Cohen, I. B. e Westfall, R. S. (org.), Rio de Janeiro: Editora Uerj/ Contraponto, 2002.

- (2) De acordo com a mecânica newtoniana, se o estado (posições e velocidades das partículas) de um sistema for conhecido num certo instante, poderá ser determinado em qualquer momento passado ou futuro. Esse é o núcleo da ideia de *determinismo*, à qual Laplace (Pierre Simon, Marquês de Laplace, 1749-1827) deu uma elegante formulação filosófica:

“Uma inteligência que, num dado instante, conhecesse todas as forças que animam a natureza e a situação de todos os elementos que a compõem e se, além disso, fosse suficientemente grande para submeter todos esses dados à análise, abrangeria na mesma fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e os do mais minúsculo átomo: nada para ela seria desconhecido, e o passado, como o futuro, estaria aberto diante de seus olhos. A mente humana provê uma fraca semelhança dessa inteligência, com a perfeição dada à astronomia”.

- (3) *Experiência imaginária* (hipotética, mental ou *gedankenexperimente*) é uma descrição de procedimento experimental e de seus possíveis resultados, *deduzidos por raciocínio consistente com uma determinada teoria*. O procedimento experimental descrito não implica possibilidade de sua realização, seja por empecilhos tecnológicos, que poderiam eventualmente ser superadas ou até mesmo por dificuldades de princípio insuperáveis. No entanto, as premissas dos argumentos utilizados na experiência imaginária devem pertencer a alguma teoria física que se pretenda comprovar ou invalidar e a experiência consiste numa dedução a partir dessas premissas apenas: *não deve haver novos fatos empíricos sobre os quais se apoia o raciocínio*. Experiências imaginárias não podem substituir experiências e observações reais e se os dois tipos entram em conflito no contexto de uma determinada teoria física, o mais provável é que a imaginária seja abandonada.

As experiências imaginárias têm sido especialmente importantes em épocas de mudança de paradigmas científicos (revoluções científicas), quando servem para testar novos conceitos. Justamente por causa disso, o nome de Einstein tem sido associado ao conceito de experiência imaginária porque, na exposição das novas ideias não-intuitivas da teoria da relatividade, teve de apelar muitas vezes para experiências imaginárias. O leitor poderá apreciar neste texto como elas são poderosas. Einstein foi um excepcional inventor de experiências imaginárias. O famoso debate Bohr-Einstein sobre os fundamentos da mecânica quântica se realizou em cima de experiências imaginárias, extraordinariamente sutis, inventadas por cada um deles para demolir o argumento do outro.

Experiências imaginárias ou, pelo menos um tipo de raciocínio próximo do que hoje denominamos “experiência imaginária”, foram utilizadas na Antiguidade, desde Tales e outros filósofos pré-socráticos. Galileu, já na revolução científica dos séculos XVI e XVII, utilizou-as com grande perspicácia. Uma das mais notáveis foi a forma como demonstrou, nos *Discursos sobre duas novas ciências**, que a aceleração de um corpo em queda livre é independente da massa do corpo. Reproduzimos o diálogo entre Salviati (supostamente o próprio Galileu) e Simplicio (defensor da física de Aristóteles), que mantinha que a rapidez natural de um corpo em queda livre era função de seu peso:

* Galilei, Galileu, *Dois novas ciências*, São Paulo, Nova Stella – Ched Editorial, s. data.

Salviati – Sem recorrer a outras experiências, podemos provar claramente, por meio de uma demonstração breve e concludente, que não é verdade que um corpo mais pesado se move com maior rapidez do que outro menos pesado, desde que ambos sejam da mesma matéria, como é o caso daqueles de que fala Aristóteles. Porém, diga-me Simplício, se você admite que a cada corpo pesado em queda corresponde uma determinada rapidez fixada pela natureza, de modo que não se possa aumentá-la ou diminuí-la a não ser usando força (violência) ou opondo-lhe alguma resistência?

Simplício – Não se pode duvidar que o mesmo corpo, movendo-se no mesmo meio, tem a rapidez fixada e determinada pela natureza, que não pode ser aumentada a não ser acrescentando-lhe um novo ímpeto, nem diminuída salvo por algum impedimento que o retarde.

Salviati – Se tivéssemos, portanto, dois corpos, cujas rapidezzes naturais são desiguais, é evidente que, se unirmos os dois, o mais rápido será parcialmente retardado pelo mais lento, enquanto este aumentará em parte sua rapidez devido ao mais veloz. Não concorda com minha opinião?

Simplício – Parece-me que assim é indubitavelmente.

Salviati – Porém, se é assim, e se uma grande pedra se move, por exemplo, com uma rapidez, digamos de oito, enquanto uma menor se move com uma rapidez de quatro, então quando estão unidas, o sistema se moverá com uma rapidez menor do que oito. No entanto, as duas juntas formam uma pedra maior do que aquela que se movia com rapidez de oito graus; do que se segue que esse sistema, que também é maior do que a primeira pedra, mover-se-á mais lentamente do que a primeira pedra, que é menor, o que contradiz sua suposição. Você vê que, de sua suposição de que um corpo mais pesado se move com mais rapidez do que um menos pesado, concluo que o mais pesado se move com menor rapidez.

Simplício – Estou completamente confuso, pois parece-me que a pedra menor, unida à maior, aumenta seu peso e, aumentando seu peso, não vejo como não deva aumentar-lhe também a rapidez ou, pelo menos, não diminuí-la.

- (4) Ernst Mach (1838-1916), físico e filósofo, publicou uma análise crítica e histórica da mecânica que se tornou uma obra clássica e teve grande influência em Einstein, que a leu na juventude, especialmente porque balançou sua fé dogmática na mecânica. As principais inovações na mecânica de Mach são a abolição do espaço absoluto e a formulação da lei de inércia em relação ao referencial das estrelas. Positivista, mantinha como central em sua filosofia o princípio de que nenhuma proposição nas ciências naturais seria permitível se não fosse verificável empiricamente. Isso o levou a rejeitar como metafísicas as ideias de espaço e tempo absolutos e o éter. Mas também o levou à rejeição de moléculas e átomos nas teorias físicas, porque não eram diretamente observados, posição que, ainda em sua vida, seria verificada como insustentável. Para Mach nada existe no mundo além de sensações e suas conexões. Por isso, a física deveria ser estudada num contexto mais amplo que envolvesse psicologia e fisiologia: “Física não é o mundo inteiro; a biologia também está presente e pertence essencialmente à visão do mundo.”*

* Mach, Ernst, *Scientific thought*, 7, 225 (citado por Holton, Gerald, *Thematic origins of scientific thought*, Cambridge, Mass., Harvard University Press 1988, Cap. 7, p. 256)

Einstein tinha grande admiração por Mach e o colocava entre os poucos cientistas que considerava como seus precursores: Newton, Maxwell, Mach, Planck e Lorentz. No início de sua vida científica, Einstein sofreu forte influência da epistemologia radicalmente positivista de Mach, mas afastou-se dela na maturidade. Para Mach, o conhecimento científico do mundo consiste na descrição mais simples possível das conexões entre as

sensações (*leis, teorias*) e tem como único objetivo o domínio intelectual desses fatos com o menor esforço possível (*princípio da economia do pensamento*); para Einstein, a invenção de conceitos científicos e a construção de teorias científicas eram livres criações da mente humana.

Nos primeiros anos após a publicação da TRE, Mach manifestou-se a favor dela, mas afastou-se depois por julgá-la cada vez mais dogmática. Einstein, com sua permanente autoconfiança, debitou a mudança de posição de Mach na diminuição da capacidade deste em absorver novas ideias com a idade.

(5) As Equações de Maxwell têm no sistema gaussiano de unidades o seguinte formato:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = q,$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0,$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \frac{d\varphi_E}{dt},$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{d\varphi_B}{dt}.$$

A velocidade da luz aparece explicitamente nessas equações. Para Maxwell, o referencial em relação ao qual a velocidade c deveria ser medida – e no qual as equações seriam válidas – era o referencial do éter. Como o éter está em repouso em relação ao espaço absoluto, os referenciais do éter e do espaço absoluto são idênticos e nos referiremos a ambos indistintamente.

(6) Na conclusão de sua primeira experiência com o interferômetro (1881), Michelson afirmou que o resultado nulo implicava ser incorreta a hipótese de um éter estacionário. O resultado nulo foi decepcionante não apenas para ele, que esperava poder medir a velocidade da Terra em relação ao éter – *o vento do éter* –, como para físicos eminentes que acompanhavam os desenvolvimentos da teoria eletromagnética. Lorentz teve dúvidas quanto à interpretação do resultado e Michelson foi instado por Rayleigh a repeti-la. Foi o que fez em 1887, com seu colega Edward. W. Morley, aperfeiçoando ainda mais o aparelho, que já era notável por sua precisão. O resultado nulo se repetiu. Muito trabalho foi envolvido na análise dos detalhes do aparelho e do resultado, mas não se descobriu nada que invalidasse a experiência. Abriu-se assim um problema de difícil solução para a física clássica.

Albert Abraham Michelson (1852-1931) não obteve nenhum grau universitário formalmente – todos lhe foram concedidos *honoris causa*. Antes da experiência de 1881, ele já se tornara o físico norte-americano mais conhecido no meio científico, devido a suas medições da velocidade da luz. Os extremos cuidados e a precisão com que fazia suas experiências explica por que o resultado da experiência de medida da velocidade da Terra em relação ao éter, mesmo sendo totalmente inesperado, foi merecedor de crédito no meio científico. Michelson foi agraciado com o Prêmio Nobel de 1907, citado pela invenção de seu interferômetro e suas aplicações em metrologia e espectroscopia e não pelas experiências relacionadas à medida da velocidade da Terra em relação ao éter, discutidas neste texto.

- (7) O físico irlandês G. F. FitzGerald foi o autor da conjectura de que os corpos se contraem por um fator de $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ na direção do movimento, hoje denominada *contração de FitzGerald-Lorentz*. No breve artigo em que propõe a contração, FitzGerald fez o seguinte comentário a respeito do arrastamento do éter na experiência de MM*:

“Li com muito interesse a maravilhosa e delicada experiência dos senhores Michelson e Morley que tenta decidir a importante questão de quanto o éter é arrastado com a Terra. O resultado deles parece oposto a outras experiências, que mostram que o éter no ar não pode ser arrastado, a não ser de forma desprezível. Eu sugeriria que talvez a única hipótese que poderia conciliar essa oposição é que o comprimento dos corpos materiais varia quando eles se movem através do éter, dependendo de se moverem ao longo de seu comprimento ou perpendicularmente a ele, de uma grandeza que depende do quadrado da razão da velocidade deles para a da luz.”

Segue-se uma discussão a respeito de forças moleculares, mostrando que ele pensava numa contração devida à modificação das forças moleculares no objeto por causa do movimento deste e não devida diretamente ao *movimento do objeto em relação ao observador*. Esse fato e a menção ao éter como uma entidade objetivamente real, mostram que a contração proposta é uma hipótese ainda no contexto da física clássica e não tem relação com a teoria da relatividade de Einstein.

Em sua excelente biografia de Einstein, A. Pais** desenha um perfil curioso de FitzGerald. Era um cientista ao mesmo tempo ousado e modesto, desprovido da competitividade que hoje caracteriza o trabalho científico. Dizia de si mesmo: “Não sendo nada sensível ao fato de cometer erros, me apresso em expor todo tipo de ideias, mesmo cruas, com a esperança de que elas possam motivar outros e conduzir a algum avanço.” Tendo Lorentz chegado independentemente à conjectura da contração dos corpos em movimento três anos depois de FitzGerald e, tendo sido informado da ideia anterior deste, escreveu-lhe para obter referência da publicação e poder citá-la em seus trabalhos. A resposta de FitzGerald é muito interessante: informa que seu artigo fora enviado para a *Science*, mas que não está certo de que fora publicado e prossegue modestamente: “Estou bastante seguro de que sua publicação (sobre o assunto) é anterior a qualquer das minhas publicações impressas”.

Há na obra mencionada de Pais uma citação de Oliver Heaviside, que fora amigo de FitzGerald, que vale a pena reproduzir, pela originalidade com que expõe o perfil científico deste: “Ele tinha, sem dúvida, entre nós todos o cérebro mais rápido e mais original. Isso era uma grande distinção; mas era, penso, uma infelicidade para sua vida científica. Ele via muitos caminhos. Seu cérebro era muito fértil e inventivo. Penso que teria sido melhor para ele se tivesse sido um pouco estúpido – digo, não tão rápido e versátil, mas mais pertinaz. Ele teria sido melhor apreciado, exceto por poucos”.

Em 1892, Lorentz, ao tentar conciliar o resultado nulo da experiência de MM com a ideia do éter, chegou à mesma conjectura de FitzGerald, que é, por isso, denominada *hipótese de FitzGerald-Lorentz*. De acordo com Lorentz, também, a contração dos objetos na direção do movimento é um efeito *objetivamente real* e não um efeito relativo ao movimento do observador e o éter persiste como ente real da natureza (éter de Fresnel ou de Maxwell). A hipótese de FitzGerald-Lorentz desagradava os físicos da época, porque era *ad hoc* – inventada explicitamente para explicar o resultado nulo da experiência de MM.

* FitzGerald, G. F., *Science*, **13**, 390 (1889), conforme a biografia citada abaixo.

** Pais, Abraham, *Sutil é o Senhor – a ciência e a vida de Albert Einstein*, Rio de Janeiro, Editora Nova Fronteira, 2000.

Problemas

Os problemas 1 a 3 estão relacionados à interpretação clássica da experiência de Michelson-Morley.

- 1.1** A bússola de um avião indica que ele voa na direção $S \mapsto N$ e o velocímetro indica uma velocidade de 200 km/h relativa ao ar. Há um vento de 80 km/h na direção $O \mapsto L$. a) Qual é a velocidade do avião em relação ao solo? b) Em que direção o piloto deverá apontar o avião para atingir um objetivo ao norte e qual será sua velocidade relativa ao solo?
- 1.2** Um rio de 100 m de largura corre para o norte com velocidade de 5 km/h; um homem rema uma canoa, cruzando o rio, com velocidade de 5 km/h perpendicularmente à corrente. a) Qual é a velocidade da canoa relativa à margem? b) Em que ponto ao norte do ponto de partida a canoa atingirá a margem oposta? c) Quanto tempo a canoa levará para atravessar o rio?
- 1.3** Um avião faz o trajeto de ida e volta entre as cidades A e B com velocidade u em relação ao ar estacionário. Calcule a diferença dos tempos de trajeto entre as situações em que há um vento com velocidade v de A para B e perpendicular a AB.

Os problemas 4 a 6 têm relação com a interpretação da aberração da luz das estrelas.

- 1.4** Gotas de chuva, que caem verticalmente, deixam riscos com inclinação de 30° , em relação à vertical, nas janelas dos vagões de um trem, que viaja à velocidade de 20 km/h para leste. a) Ache a componente horizontal da velocidade da gota em relação ao solo e em relação ao trem. b) Ache a velocidade da gota em relação ao solo e em relação ao trem.

Resposta: $v_s = 34,6$ km/h $v_{tr} = 40$ km/h.

- 1.5** Um astrônomo observa uma estrela distante próxima ao plano da eclíptica da Terra. Qual é a figura desenhada pela estrela, devido ao fenômeno de aberração da luz e qual é sua dimensão (ângulo de visão em segundos de grau)?
- 1.6** Justifique a seguinte afirmativa: a experiência de aberração da luz das estrelas mostra que o referencial do Sol é um referencial inercial melhor do que o referencial da Terra.

