

1. O experimento de Michelson-Morley

Como vimos na teoria, no século XIX acreditava-se que a luz necessitaria de um meio para se propagar: o éter. Esse éter seria invisível e penetraria todos os corpos, preenchendo todo o Universo. Desse modo, a luz teria a velocidade $c \cong 3 \cdot 10^8$ m/s, em relação ao éter.

Se essa hipótese fosse correta, sendo \vec{v} a velocidade da Terra em relação ao éter (fig. 1), para um referencial na Terra, haveria um “vento” de éter com velocidade $-\vec{v}$ em relação à Terra.

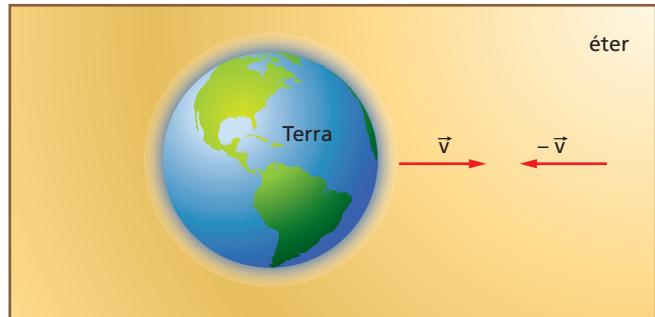


Figura 1.

Em 1881, o americano Albert Abraham Michelson (1852-1931) resolveu testar essa hipótese, construindo o aparelho esquematizado na figura 2. Uma fonte de luz F produz um feixe estreito de luz que atinge o espelho semiprteado E_1 .

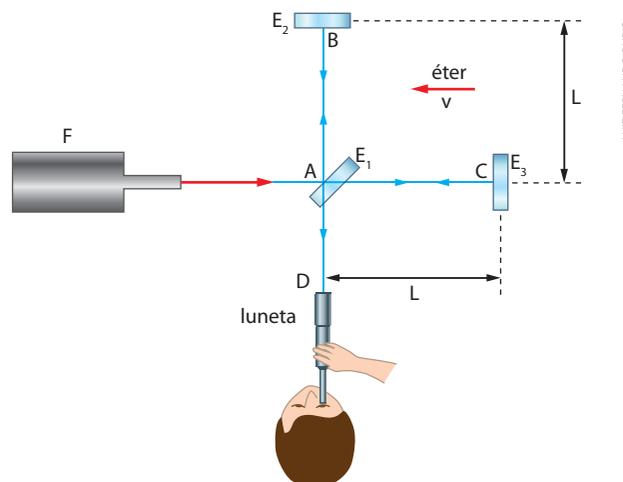


Figura 2.

Esse espelho é feito de uma lâmina de vidro recoberta com uma camada muito fina de prata de modo que ele reflete uma parte da luz (feixe AB) mas deixa passar outra parte (feixe AC). O feixe AC reflete no espelho E_3 , volta para o espelho E_1 e tem uma parte refletida (feixe AD) que atinge uma luneta. O feixe AB reflete-se no espelho E_2 e volta para o espelho E_1 onde uma parte o atravessa, fazendo o percurso AD e também atingindo a luneta. Desse modo, no trecho AD temos dois feixes superpostos (ABAD e ACAD) que, ao atingirem a luneta, vão interferir, produzindo franjas. Analisando essas franjas, Michelson teve condições de dizer se os tempos dos percursos ABAD e ACAD foram iguais ou diferentes. Se não houvesse o vento do éter esses tempos deveriam ser iguais (pois $AB = AC = L$). Mas, se houvesse o vento do éter, os tempos deveriam ser diferentes, como mostraremos a seguir.

Aqui a situação é semelhante à que encontramos no volume 1, quando analisamos problemas em que um barco se movia sobre um rio: ora na direção da correnteza, ora na direção perpendicular à correnteza.

Sendo \vec{c} a velocidade da luz em relação ao éter e \vec{v} a velocidade do vento de éter em relação à Terra, a velocidade da luz em relação à Terra será representada por \vec{v}' . Na figura 3 obtemos \vec{v}' , em cada trecho:

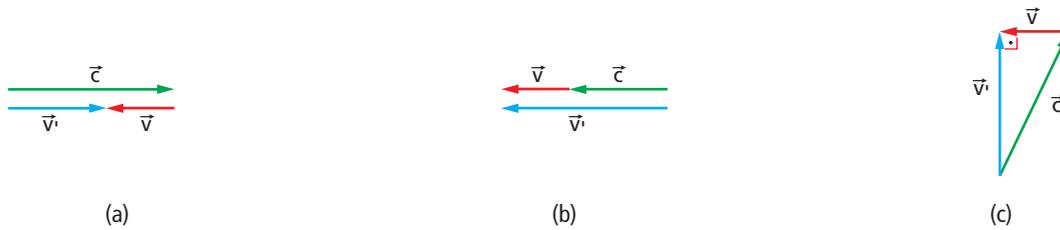


Figura 3.

No percurso AC (fig. 3a), temos $v' = c - v$, e o tempo para esse percurso é:

$$t_{AC} = \frac{L}{v'} = \frac{L}{c - v}$$

No percurso CA (fig. 3b), temos $v' = c + v$, e o tempo para esse percurso é:

$$t_{CA} = \frac{L}{v'} = \frac{L}{c + v}$$

Os percursos AB e BA serão feitos com velocidades de mesmo módulo v' (fig. 3c) dado por $v' = \sqrt{c^2 - v^2}$. Assim, os tempos para esses dois percursos serão iguais:

$$t_{AB} = t_{BA} = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

O tempo total para o percurso ACA é:

$$t_1 = t_{AC} + t_{CA} = \frac{L}{c - v} + \frac{L}{c + v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2}$$

e o tempo total para o percurso ABA é:

$$t_2 = 2t_{AB} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Como podemos observar, $t_1 \neq t_2$, isto é, se houvesse o vento do éter, os tempos de percurso deveriam ser diferentes e essa diferença deveria ser detectada nas franjas de interferência. Porém, Michelson não observou essa diferença e concluiu: não existe o vento do éter.

Em 1887, com o auxílio do químico americano Edward Williams Morley (1838-1923), Michelson aperfeiçoou o seu aparelho e refez o experimento com mais precisão mas, novamente, o resultado foi negativo, o vento do éter não foi detectado.

Esboço biográfico de Michelson

Michelson nasceu em 19 de dezembro de 1852, na cidade de Strelno, cuja população era polonesa mas havia sido anexada pela Prússia (hoje Alemanha), tendo sido devolvida à Polônia após a Primeira Guerra Mundial. Aos dois anos de idade, Michelson vai com seus pais para os Estados Unidos e torna-se americano.

Em 1869 ingressa na Academia Naval dos Estados Unidos, tendo se formado oficial em 1873. Em 1881 renuncia à sua patente na Marinha e passa a se dedicar ao ensino e à pesquisa, principalmente em Óptica, tendo construído instrumentos de grande precisão, com os quais fez as medidas mais precisas da velocidade da luz até então conhecidas. Por esses trabalhos ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1907.

Michelson foi o primeiro americano a ganhar um Prêmio Nobel na área de ciência. Antes dele apenas um americano tinha ganhado esse prêmio: o presidente americano Theodore Roosevelt, que recebeu o Prêmio Nobel da Paz, em 1906, por ter negociado o fim da Guerra Russo-Japonesa.

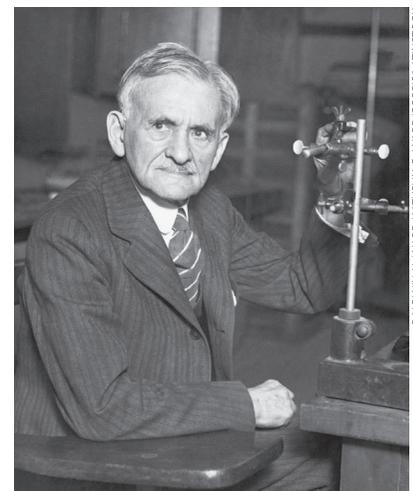


Figura 4. Albert A. Michelson (1852-1931).

2. Esboço biográfico de Einstein

Einstein nasceu na cidade alemã de Ulm, em 14 de março de 1879. Um ano depois, foi com sua família para a cidade de Munique (também na Alemanha), onde morou até 1894. Mais tarde sua família se mudou para Milão e a seguir para Pávia, na Itália. Einstein foi deixado em Munique com parentes.

Porém, desgostoso com o ensino alemão, abandonou a escola, sem terminar o ensino médio, e foi ao encontro da família. Ele concluiu o ensino médio na cidade suíça de Aarau e, em 1896, ingressou na Escola Politécnica de Zurique (Suíça), para fazer seus estudos superiores. Nesse mesmo ano renunciou à cidadania alemã e ficou sem nacionalidade até 1901, quando obteve a cidadania suíça. Durante sua estada na faculdade, começou a namorar a colega Mileva Maric, com quem se casou em 1903.

Einstein terminou o curso superior em 1900 e durante dois anos ficou numa situação financeira difícil, pois não conseguia emprego. Só obtinha algum dinheiro dando aulas particulares. Em 1902, um amigo conseguiu para ele um emprego no escritório de Patentes de Berna (Suíça), onde ficou até 1909.

Em 1905 Einstein publicou quatro trabalhos que revolucionaram a Física. Um deles era a explicação do movimento browniano, o movimento irregular de pequenas partículas suspensas em um líquido. Esse movimento tinha sido relatado pela primeira vez pelo biólogo escocês Robert Brown (1773-1858), que observou o movimento do pólen na água. Dois outros trabalhos foram sobre a relatividade, e o quarto trabalho foi uma explicação do efeito fotoelétrico, do qual falaremos no próximo capítulo.

Apesar da importância desses trabalhos, Einstein só conseguiu seu primeiro emprego em uma universidade em 1909: a Universidade de Zurique. Em 1911 foi para a Universidade de Praga, na antiga Tchecoslováquia; em 1912 foi para a Escola Politécnica de Zurique (cujo nome havia mudado para Escola Técnica Federal da Suíça); e em 1914 foi para a Universidade de Berlim, onde ficaria até 1933.

Em 1919 divorciou-se de Mileva e casou-se com uma prima, Elsa Lowenthal, que morreu em 1936.

As ideias de Einstein eram tão revolucionárias que, por muitos anos, foram encaradas com ceticismo pela maioria dos físicos. Desse modo, ele só foi receber o Prêmio Nobel (a mais alta premiação nos campos da Física, Química, Medicina, Literatura, Paz e Economia) em 1921. Ainda assim, o prêmio, entregue apenas em 1922, foi dado não em função da relatividade, mas sim do efeito fotoelétrico.

Em 1933, preocupado com a ascensão do nazismo na Alemanha, Einstein aceitou um convite para trabalhar no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, em Nova Jersey, nos Estados Unidos, onde ficou até morrer. Em 1940 tornou-se cidadão americano (mas sem abandonar a cidadania suíça).

Depois de apresentar a Teoria da Relatividade Geral em 1915, Einstein passou o resto de sua vida tentando obter uma teoria que unificasse a gravitação com o eletromagnetismo, que ele chamava de Teoria do Campo Unificado. Porém, não conseguiu.

Einstein morreu em 18 de abril de 1955.



Figura 5. Albert Einstein (1879-1955) aos 14 anos.

3. Efeito Doppler para as ondas eletromagnéticas

No caso das ondas mecânicas vimos que, quando a fonte está parada e o observador está em movimento, o efeito é diferente do percebido quando a fonte está em movimento e o observador está parado. No caso das ondas eletromagnéticas, as duas situações são equivalentes: o que importa é apenas a velocidade relativa v entre fonte e observador.

Suponhamos que no espaço sideral tenhamos duas naves, A e B , e uma fonte de luz F , todas em repouso em relação a um mesmo sistema de referência inercial (fig. 6).

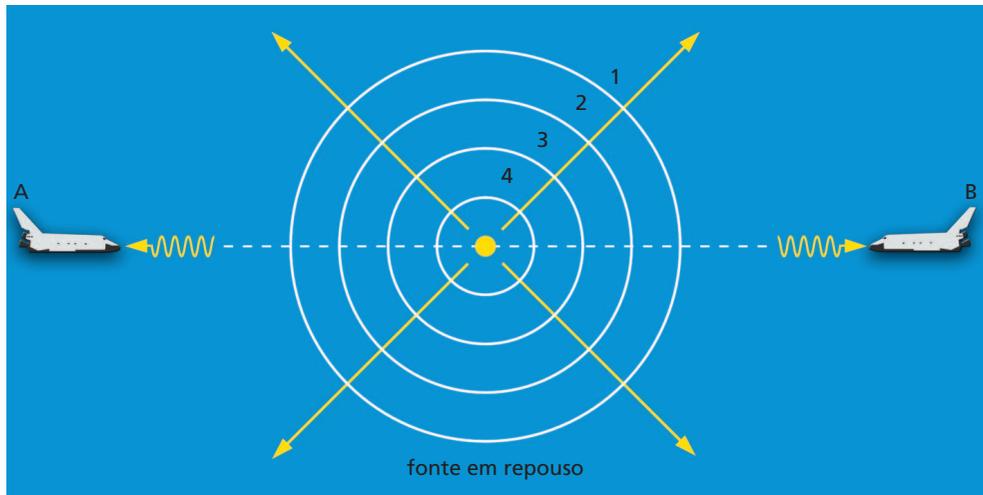


Figura 6.

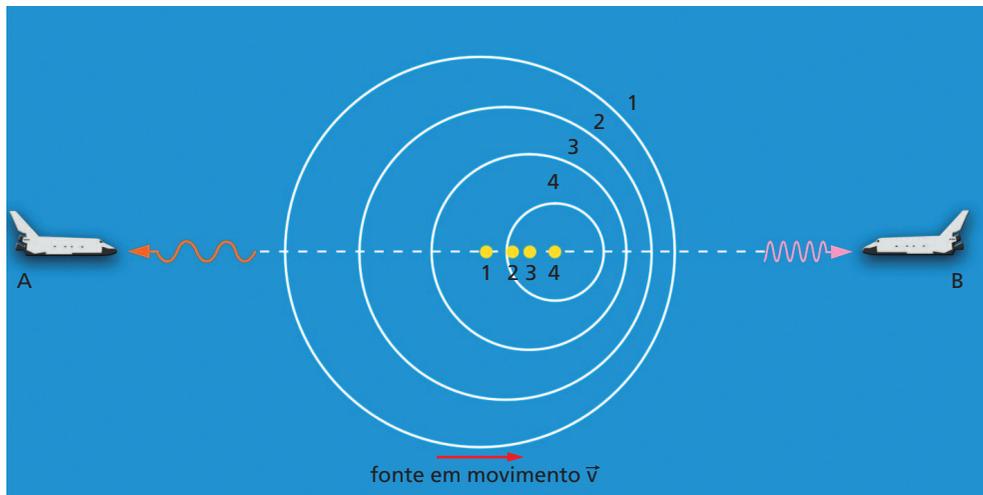


Figura 7.

As duas naves receberão luz com a mesma frequência f e o mesmo comprimento de onda λ emitidos pela fonte. Suponhamos agora que a fonte comece a se mover para a direita (fig. 7) com velocidade \vec{v} em relação ao referencial adotado. As frequências e os comprimentos de onda observados por A e B serão diferentes da frequência f e do comprimento de onda λ emitido pela fonte:

$$\lambda_A > \lambda \quad \text{e} \quad \lambda_B < \lambda$$

$$f_A < f \quad \text{e} \quad f_B > f$$

Einstein mostrou que, sendo c a velocidade da luz, temos:

$$f_A = f \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} \quad \text{e} \quad f_B = f \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

(afastamento) (aproximação)

As duas equações podem ser reunidas numa única:

$$f_o = f \sqrt{\frac{c \pm v}{c \mp v}} \quad \text{ou} \quad f_o = f \sqrt{\frac{1 \pm \beta}{1 \mp \beta}}$$

sendo $\beta = \frac{v}{c}$ e f_o a frequência observada.

Para os sinais temos:

- I. se houver aproximação entre fonte e observador, usamos os sinais superiores;
- II. se houver afastamento entre fonte e observador, usamos os sinais inferiores.

Quando $v \ll c$, teremos $\beta \ll 1$ e poderemos usar a aproximação binomial:

$$f_0 = f \sqrt{\frac{1 \pm \beta}{1 \mp \beta}} = f(1 \pm \beta)^{\frac{1}{2}}(1 \mp \beta)^{-\frac{1}{2}} \cong f\left(1 \pm \frac{\beta}{2}\right)\left(1 \pm \frac{\beta}{2}\right) = f\left(1 \pm \frac{\beta}{2}\right)^2 = f\left(1 \pm \beta + \frac{\beta^2}{4}\right)$$

Sendo $\beta \ll 1$, teremos $\beta^2 \ll \beta$ e, assim:

$$f_0 \cong f(1 \pm \beta)$$

+ → aproximação

- → afastamento

Exemplo

Suponhamos que, em uma estrada, um aparelho de radar (R) seja utilizado para medir a velocidade (v) de um automóvel, como na figura 8.

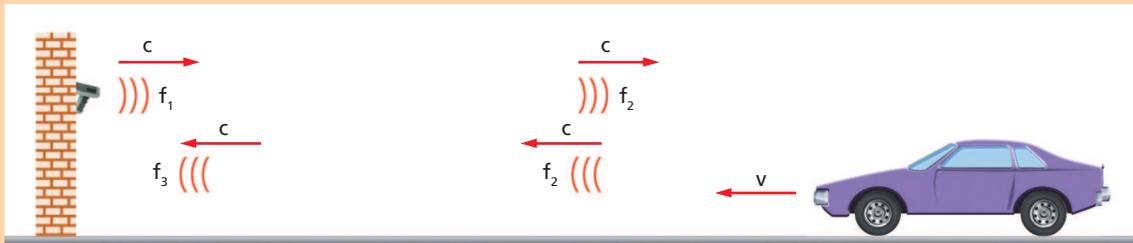


Figura 8.

O radar emite ondas de frequência f_1 e o automóvel recebe ondas de frequência f_2 :

$$f_2 = f_1 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad (1) \quad \left(\beta = \frac{v}{c}\right)$$

O automóvel reflete ondas de frequência f_2 que são recebidas pelo aparelho com frequência f_3 :

$$f_3 = f_2 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad (2)$$

De (1) e (2) obtemos:

$$\begin{aligned} f_3 &= f_1 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} = f_1 \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right) \Rightarrow \\ \Rightarrow f_3(1 - \beta) &= f_1(1 + \beta) \Rightarrow f_3 - f_3\beta = f_1 + f_1\beta \Rightarrow \\ \Rightarrow f_3 - f_1 &= f_1\beta + f_3\beta \Rightarrow f_3 - f_1 = f_1\beta + f_3\beta + \underbrace{f_1\beta - f_1\beta}_0 \Rightarrow \\ \Rightarrow f_3 - f_1 &= 2f_1\beta + (f_3 - f_1)\beta \Rightarrow (f_3 - f_1) - \beta(f_3 - f_1) = 2f_1\beta \Rightarrow \\ \Rightarrow f_3 - f_1 &= \frac{2f_1\beta}{1 - \beta} \end{aligned}$$

Sendo $v \ll c$, temos $\beta \ll 1$ e $1 - \beta \cong 1$. Assim:

$$f_3 - f_1 \cong 2f_1\beta \Rightarrow \beta \cong \frac{f_3 - f_1}{2f_1} \Rightarrow \frac{v}{c} \cong \frac{f_3 - f_1}{2f_1} \Rightarrow v \cong \frac{c(f_3 - f_1)}{2f_1}$$

Desse modo, é determinado o valor da velocidade do automóvel.

Exercícios

1. No próximo capítulo, veremos que os gases aquecidos emitem luzes com frequências bem determinadas. No caso do hidrogênio, a luz de frequência mais baixa emitida tem frequência $4,57 \cdot 10^{14}$ Hz. Uma estrela afasta-se da Terra com velocidade $v = 0,600c$. Determine a frequência com que essa luz é recebida na Terra.
2. Uma estrela emite uma onda eletromagnética de frequência $6,00 \cdot 10^{14}$ Hz, que é recebida na Terra com frequência $4,50 \cdot 10^{14}$ Hz. Qual a velocidade da estrela em relação à Terra?
3. Em uma estrada de rodagem, o radar da polícia emite ondas com frequência $f = 20$ GHz. Um carro que se aproxima do aparelho reflete as ondas, que são recebidas com frequência f' , tal que $f' = f + 4\,000$ Hz. Calcule a velocidade do automóvel.
4. Uma nave espacial que se aproxima da Terra emite luz com frequência $5,00 \cdot 10^{14}$ Hz, que é recebida na Terra com frequência $6,12 \cdot 10^{14}$ Hz. Qual a velocidade da nave em relação à Terra?

