



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



Michelson, Morley, Rayleigh e as Velocidades de Fase e de Grupo da Luz.

A medida da velocidade da luz foi o principal motivo da vida científica do físico germano-norte-americano Albert Abraham Michelson (1852-1931; PNF, 1907). [Para detalhes dessa saga de Michelson, ver, por exemplo: B. Jaffe, **Michelson e a Velocidade da Luz** (EDART, 1967) e Isaac Asimov, **Os Gênios da Humanidade** (Bloch, 1974).] Michelson iniciou essas medidas em 1878 (*American Journal of Science* **15**, p. 394), quando usou um dispositivo semelhante ao utilizado pelos físicos franceses Armand Hyppolyte Louis Fizeau (1819-1896) e Jean Bernard Leon Foucault (1819-1868). Observe-se que Fizeau, em 1849 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* **29**, p. 90), determinou a velocidade da luz realizando a seguinte experiência. No topo de uma colina colocou uma roda dentada com cerca de 720 dentes, tendo um espelho por trás, e um outro espelho foi colocado a uma distância de 8 quilômetros (km). A velocidade da roda dentada era controlada de modo que a luz passasse entre dois dentes consecutivos na ida e na volta. De posse das dimensões da roda, de sua velocidade angular e da distância entre os espelhos, Fizeau encontrou para a velocidade da luz um valor de 315.000 km/s . Por sua vez, em 1862 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* **55**, pgs. 501; 792), Foucault substituiu a roda dentada utilizada por Fizeau por um espelho giratório, encontrando então o valor de 298.000 km/s .

Objetivando calcular a velocidade da luz com valores cada vez mais precisos, assim como verificar a existência do **éter luminífero cartesiano** (ELC) (sobre este éter e seu papel na Física Clássica, ver verbetes nesta série) Michelson construiu, em 1881 (*American Journal of Science* **22**, p. 120), um **interferômetro**. Neste aparelho, um raio de luz é dividido em dois (r_1 , r_2) quando incide sobre uma lâmina de vidro P, cuja face posterior é coberta por uma camada fina de prata (Ag). O raio r_1 é refletido pela superfície de prata e dirige-se para um espelho M_1 colocado a uma distância d de P; o raio r_2 atravessa P e atinge um espelho M_2 colocado à mesma distância d. Após a reflexão de r_1 em M_1 esse raio percorre a mesma distância d até a placa P; uma parte dele reflete e a outra atravessa P dirigindo-se para um telescópio manipulado por um observador O. Por sua vez, o raio r_2 após refletir-se em M_2 percorre a mesma distância d até a placa P; uma parte dele reflete-se e a outra atravessa P dirigindo-se para o telescópio do observador O. Ao realizar uma experiência com esse dispositivo, Michelson acreditava que, quando os dois raios (r_1 , r_2) chegassem no telescópio, haveria um deslocamento das franjas de interferência, quando o interferômetro sofresse uma rotação. Contudo, na experiência que realizou em 1881 [no Laboratório do fisiologista e físico alemão Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), em Berlin], Michelson observou apenas um minúsculo deslocamento, indicando ser a presença do ELC incompatível com os conhecimentos da Física vigentes à época que, de acordo com tais conhecimentos, a Terra deveria caminhar através de um **éter** imóvel. Como conclusão dessa experiência, Michelson escreveu: *A hipótese do éter estacionário está errada*. Para chegar a essa conclusão, Michelson usou a **lei de composição de velocidades Galileana** e mostrou que o deslocamento da figura de interferência formada no telescópio pelos dois raios (r_1 , r_2) era dado por: $\Delta n = 2 (D v^2 / \lambda c^2)$, onde D é o percurso seguido pela luz (no vácuo) de comprimento de onda λ e velocidade c, e v é a velocidade da Terra em torno do Sol, ou equivalentemente, segundo a Teoria Ondulatória Maxwelliana, a velocidade do

ELC em relação à Terra imóvel. [Para a demonstração dessa expressão, ver, por exemplo: Arthur Beiser, **Concepts of Modern Physics** (McGraw-Hill Book Company, 1967).]

Em 1882 (*Philosophical Magazine* **18**, p. 236), Michelson voltou a realizar nova experiência para determinar a velocidade da luz, agora trabalhando na *Case School of Applied Science*, em Cleveland, Ohio, USA. Foi por essa ocasião dessa experiência que ocorreu o seguinte fato pitoresco. Certo dia daquele ano, ao examinar o caminho óptico da experiência que iria realizar, nas proximidades da linha férrea New York-Chicago-St. Louis, Michelson foi abordado por alguns jornalistas que lhe perguntaram o que estava fazendo. Em resposta, disse-lhes que estava medindo a velocidade da luz. Em seguida perguntaram-lhe por que ele estava fazendo aquela medida. Respondeu Michelson: *Porque é muito divertido*. Essa mesma resposta foi dada por ele para o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) quando lhe fez a mesma pergunta muitos anos depois. Registre-se que, nessa experiência, Michelson encontrou o valor de 299.853 km/s para a velocidade da luz.

Para comprovar a importante conclusão que havia obtido em 1881, Michelson realizou uma nova experiência, em 1887 (*American Journal of Science* **34**, p. 333; *Philosophical Magazine* **24**, p. 449), desta vez com a colaboração do químico e físico norte-americano Edward Williams Morley (1838-1923). Com efeito, usando uma fonte de luz de $\lambda = 5.000 \text{ \AA}$, um percurso $D = 10 \text{ m}$ conseguido por intermédio de reflexões múltiplas nos braços do interferômetro, e considerando

$v = 10 \text{ km/s}$ e $c \approx 300.000 \text{ km/s}$, Michelson e Morley esperavam encontrar um deslocamento de 0,4

franjas, quando o interferômetro sofresse uma rotação de 90° . Contudo, ao realizarem essa experiência – a hoje famosa **experiência de Michelson-Morley** - observaram que a figura de interferência permaneceu imóvel. Como esse resultado, mais uma vez, indicava a incompatibilidade do Eletromagnetismo Maxwelliano com a Física Newtoniana, eles voltaram a realizar várias outras experiências, tanto ao meio-dia, quanto no final da tarde, assim como com uma diferença de seis meses, quando então a Terra assumiria posições simétricas em relação ao “mar de éter”; o resultado dessas experiências foi o mesmo da primeira, qual seja, a imobilidade da figura de interferência e, portanto, a inexistência do éter.

Vejamos, agora, outra importante experiência conduzida por Michelson, ocorrida três anos antes da famosa experiência de 1887, descrita acima. Tal experiência, realizada em 1884 e com seu resultado apresentado em uma reunião da *Associação Britânica para o Desenvolvimento da Ciência*, relacionava-se com a medida da velocidade da luz no disulfido carbônico (CS_2).

Basicamente, esse experimento consistiu em direcionar um feixe de luz para uma pequena janela que poderia ser aberta e fechada por intermédio de um obturador. Como este se abria e se fechava muito rapidamente, apenas um jato ou um “pacote” de luz, de comprimento de onda λ (e frequência $\omega = 2\pi\nu = 2\pi c/\lambda$), passava pela janela e atravessava o CS_2 . Assim, medindo a velocidade (v) desse “pacote”, Michelson teve uma surpresa, pois encontrou $c/v = n = 1.77$, enquanto o valor esperado, segundo a Óptica, deveria ser de 1.64, que é o valor do **índice de refração** (n) do meio atravessado pela luz, no caso, o CS_2 . Esse resultado, que também surpreendeu a comunidade científica da época, indicava que a velocidade encontrada por Michelson era menor do que a esperada.

Esse inesperado resultado obtido por Michelson foi objeto de pesquisa do físico inglês John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904), a partir de 1904, quando iniciou o estudo matemático da transmissão de ondas em meios dispersivos, como é o caso do CS_2 . Um trabalho mais elaborado dessa sua pesquisa foi apresentado por Rayleigh, em 1917 (*Philosophical Magazine* **33**, p. 496), no qual mostrou que nos meios dispersivos a onda pode deslocar-se com uma velocidade menor [conhecida desde então como **velocidade de grupo**: v_g] do que a velocidade da crista da onda [a chamada **velocidade de fase**: $v_f = c/n$]. Segundo Rayleigh, essa v_g (em linguagem atual) é dada por: $v_g = v_f - \lambda \frac{dv_f}{d\lambda} = v_f - (c/n^2) \frac{dn}{d\lambda} = v_f + (c/n) \frac{dn}{d\lambda}$. Desse modo, usando essa expressão, é fácil explicar o resultado encontrado por Michelson, como se pode ver, por exemplo, nos textos: John Strong, **Concepts of Classical Optics** (W. H. Freeman and Company, 1958) e Sir Edmund Taylor Whittaker, **A History of the Theories of Aether and Electricity** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951). Observe-se que a **velocidade de fase** representa a velocidade de uma

onda plana monocromática e que, portanto, não tem significado físico pois todo sinal luminoso é limitado no tempo e no espaço. [José Leite Lopes, **Introdução à Teoria Atômica da Matéria** (Ao Livro Técnico Ltda., 1959) e Marcel Rouault, **Física Atômica** (Ao Livro Técnico Ltda., 1959).] É oportuno destacar que a fórmula acima deduzida por Rayleigh nos mostra que quando o meio não é dispersivo ($dn/d\lambda = 0$), teremos: $v_g = v_f$. E mais ainda, em meios que apresentam **dispersão normal** ($dn/d\lambda < 0$ e $n > 1$), resulta: $v_g < v_f$. No caso da **dispersão anômala** ($dn/d\lambda > 0$ e $n > 1$), pode ocorrer que se tenha $v_g > c$. Nessa situação, a **velocidade de grupo** [$v_g(\lambda)$] deixa de ter significado físico e, para uma particular frequência ($\nu = c/\lambda$) é mais razoável definir a “velocidade média de transporte de energia” conhecida como **velocidade de sinal** (v_S). Registre-se que essa v_S foi discutida pelos físicos, o alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) e o francês Leon Nicolas Brillouin (1889-1969), em 1932 (*Congrès International d'Electricité*, V. II, Paris). [Wolfgang Kurt Hermann Panofsky e Melba Phillips, **Classical Electricity and Magnetism** (Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1962).]

Note-se que a **dispersão anômala** foi pela primeira vez observada, em 1870 (*Annalen der Physik und Chemie* **141**, p. 479), pelo físico dinamarquês Christian Christiansen (1843-1917) ao analisar as **raias espectrais de Fraunhofer** (sobre essas raias ver verbete nesta série) em uma solução alcoólica com 18.8% de anilina. Dessa análise, concluiu que, naquele tipo de dispersão, luz de maior frequência (ω) tem velocidade maior do que a de menor frequência, o que ocasiona, por exemplo, que a luz violeta tenha maior velocidade do que a de menor frequência. Desse modo, quando a luz branca (composição de todas as cores) atravessa um meio no qual há dispersão anômala, a luz violeta refrata menos do que a vermelha, conforme a Lei da Refração da Luz (vide verbete nesta série). Logo depois, em 1871 (*Annalen der Physik und Chemie* **142**, p. 163), o físico alemão August Adolph Eduard Eberhardt Kundt (1839-1894) confirmou essa descoberta de Christiansen. [William Francis Magie, **A Source Book in Physics** (McGraw-Hill Book Company, Inc., 1935).]

Voltemos aos trabalhos de Michelson e de Rayleigh tratados até aqui. Em vista deles, as experiências realizadas pelo astrônomo dinamarquês Olaus Roemer (1644-1710), em 1676, e por Fizeau, Foucault, Christiansen e Kundt, referidas acima, foram reanalisadas tendo em vista o novo conceito de **velocidade de grupo**.

Ao concluir este verbete, é oportuno destacar três comentários sobre os temas aqui tratados. Dois deles, sobre a determinação da velocidade da luz, e o terceiro, sobre o conceito de **velocidade de grupo**. O primeiro comentário deve-se ao próprio Michelson em seu livro intitulado **Light Waves and Their Uses** (Chicago University Press, 1903), no qual registrou o resultado de suas pesquisas sobre as medições espectroscópicas da velocidade da luz: *Nossas descobertas futuras devem se preocupar com a sexta casa decimal*. A título de curiosidade, note-se que a comprovação experimental de uma previsão teórica da Eletrodinâmica Quântica (vide verbete nesta série), ocorreu com a medida do **momento magnético do elétron** (μ_e), em 1948 (Henry Michael Foley e Polykarp Kusch, *Physical Review* **73**, p. 412), justamente até a sexta casa decimal:

$\mu_e = (1.001146 \pm 0.000012) \mu_0$, onde $\mu_0 = (e h/2 m_e c)$ é o **magnéton de Bohr**.

O segundo comentário foi proferido por Einstein e relacionado com a repetição da **experiência de Michelson-Morley** realizada pelo físico norte-americano Dayton Clarence Miller (1886-1941), em 1921, no *Observatório de Monte Wilson*, na Califórnia. Quando Einstein visitou pela primeira vez os Estados Unidos, em abril de 1921, ele realizou, em maio desse mesmo ano, quatro conferências em Princeton sobre a Teoria da Relatividade, em cuja formulação, desenvolvida por ele próprio, não há necessidade do **éter luminífero cartesiano** (ELC). Em Princeton, Einstein ouviu dizer que Miller havia realizado, entre 8 e 21 de abril, as primeiras experiências nas quais encontrara um resultado positivo em relação à presença do ELC. Ao ouvir essa informação, Einstein pronunciou a famosa frase: *Sutil é o Senhor, mas malicioso Ele não é* (“Raffiniert ist der Herr Gott, aber boshaft ist er nicht”). Apesar dessa frase, antes de partir dos Estados Unidos, Einstein fez uma visita a Miller, em Cleveland, em 25 de maio de 1921, ocasião em que discutiram sobre as experiências desse físico experimental. É oportuno dizer que Miller publicou o resultado de suas experiências,

em 1925 (*Proceedings of the National Academy of Sciences* **11**, p. 306; *Science* **61**, p. 617) e em 1926 (*Science* **63**, p. 433). Em 1927 (*Forschungen und Fortschritte* **3**, p. 36), Einstein afirmou que o resultado positivo sobre a existência do éter encontrado por Miller, era devido à influência da temperatura no equipamento por ele utilizado. Por fim, em 1933 (*Review of Modern Physics* **5**, p. 203), Miller apresentou um novo resultado em favor do ELC. [Abraham Pais, ‘**Subtle is the Lord ...**’: **The Science and the Life of Albert Einstein** (Oxford University Press, 1982).]

O terceiro comentário relaciona-se, conforme dissemos acima, com o conceito de **velocidade de grupo**. Segundo Kirk T. McDonald [*American Journal of Physics* **69**, p. 607 (2001)], parece que esse conceito foi apresentado pelo físico e matemático irlandês Sir William Rowan Hamilton (1805-1865), em 1839 (*Proceedings of Royal Irish Academy* **1**, pgs. 267; 341). Por outro lado, a primeira observação de uma velocidade de grupo de uma onda de água é devida ao engenheiro naval escocês John Scott Russell (1808-1882). Com efeito, em agosto de 1834, ele cavalgava ao longo da margem do estreito *Canal Union*, próximo de Edinburgh, na Escócia, quando, repentinamente, observou uma onda curiosa, uma grande massa de água se propagando ao longo daquele canal. Em 1844 (*Report of the Fourteenth Meeting of the British Association for the Advancement of Sciences*, pgs. 309-311), por ocasião de uma Reunião da *Associação Britânica para o Progresso das Ciências*, Russell anunciou a existência de **ondas solitárias** (“uma grande elevação ‘solitária’ ... arredondada, uniforme e bem definida quantidade de água, que continuou seu curso ao longo do canal aparentemente sem mudar de formar ou diminuir de velocidade”) (p. 321) e da **velocidade de grupo** (p. 369) das ondas líquidas. A **velocidade de grupo** voltou a ser referida, por exemplo, em 2 de fevereiro de 1876, como o problema 11 do exame do *Prêmio Smith*, preparado pelo físico e matemático inglês Sir George Gabriel Stokes (1819-1903); e por T. H. Havelock, em 1914 [*The Propagation of Disturbances in Dispersive Media* (Cambridge University Press)]. [H. C. von Bayer, *The Sciences* (May/June, p. 10, 1999); McDonald, op. cit.]

Um novo aspecto do conceito de **velocidade de grupo** ocorreu em, 1904 (*Proceedings of the London Mathematical Society* **1**, p. 473), quando o matemático inglês Sir Horace Lamb (1849-1934), citando o físico germano-inglês Sir Arthur Schuster (1851-1934), afirmou que, na região de dispersão anômala (que tratamos acima), a **velocidade de grupo** (v_g) pode ter sentido contrário ao da **velocidade de fase** (v_f). Essa afirmação foi corroborada pelo físico alemão Max Theodor Felix von Laue (1879-1960; PNF, 1914), em 1905 (*Annalen der Physik (Leipzig)* **18**, p. 473).

Vejamos de que maneira acontece essa inversão. Usando a definição de v_g dada por $v_g = d\omega/dk$, com $k = \omega c/n$, pode-se demonstrar que: $v_g = d\omega/dk = 1/(dk/d\omega) = c/[n + \omega (dn/d\omega)]$. Portanto, como na região de dispersão anômala, n decresce rapidamente com o aumento da frequência ω , quando esta se aproxima da linha espectral de absorção do meio, ou seja, $dn/d\omega < 0$; então, a expressão acima indica que poderemos ter uma **velocidade de grupo negativa**. No entanto, a observação desse efeito era muito difícil pela dificuldade de trabalhar com frequências próximas das frequências do espectro de absorção.

A dificuldade apontada acima foi contornada pela sugestão apresentada por C. G. B. Garrett e D. E. McCumber, em 1970 (*Physical Review* **A1**, p. 305) e retomada por R. Y. Chiao, em 1993 (*Physical Review* **A48**, p. R34), qual seja: a inversão da população atômica permite um acréscimo (“gain”) nas linhas do espectro de absorção no meio onde ocorre a dispersão anômala. Desse modo, o sinal da v_f é o mesmo para as ondas incidente e transmitida, e o fluxo de energia no interior desse meio tem a direção oposta do fluxo de energia incidente no vácuo. Por fim, uma experiência usando essa técnica foi realizada por L. Wang, A. Kuzmich e A. Dogariu, em 2000 (*Nature* **406**, p. 277). Para maiores detalhes sobre a **velocidade de grupo negativa**, ver: McDonald, op. cit.



ANTERIOR

SEGUINTE