

A Velocidade da Luz

Michael Fowler

Universidade de Virgínia, Departamento de Física

As primeiras ideias sobre a propagação da luz

As tentativas para determinar a velocidade da luz tiveram um papel importante na formulação da teoria da relatividade e, de facto, a velocidade da luz é central nesta teoria.

O primeiro registo de uma discussão sobre a velocidade da luz é, penso eu, de Aristóteles, em que este cita Empedocles, que afirmava que a luz do Sol devia demorar algum tempo até chegar à Terra, afirmação de que Aristóteles, e até Descartes, discordavam, supondo que a luz chegava à Terra no mesmo instante em que era emitida. Galileu no seu livro *Two New Sciences* utiliza a personagem de Simplicio, tal como noutras passagens da obra, para defender a posição de Aristóteles:

SIMP. A experiência diária revela que a propagação da luz é instantânea; quando vemos uma peça de artilharia a ser disparada a grande distância, a luz da explosão chega aos nossos olhos imediatamente; o som chega aos nossos ouvidos após um intervalo de tempo perceptível.

Como é óbvio, Galileu aponta o facto de nada se poder concluir sobre a velocidade da luz a partir desta observação, exceto que a luz se propaga mais rapidamente que o som. Em seguida sugere uma possível forma de determinar a velocidade da luz. A ideia é ter duas pessoas bastante afastadas uma da outra com lanternas escondidas. A primeira pessoa mostra a sua lanterna e a segunda faz exatamente o mesmo após ter visto a luz da primeira lanterna. A experiência deve ser *treinada* inicialmente com as duas pessoas próximas uma da outra, para que se habituem aos tempos de reação envolvidos, e em seguida praticada com as pessoas a duas ou três milhas¹ de distância, ou até mais afastadas, podendo utilizar-se telescópios, na tentativa de perceber se o intervalo de tempo que a luz demora desde a fonte ao recetor aumenta. Galileu afirma que realizou a experiência a distâncias inferiores a 1 milha, mas não foi capaz de detetar nenhum desfasamento entre o instante em que a luz é emitida e o instante em que é captada pelo recetor. A partir desta experiência deduziu que a velocidade da luz seria pelo menos dez vezes maior que a velocidade do som.

Determinar a Velocidade da Luz a partir das luas de Júpiter

A primeira determinação da velocidade da luz a ser executada com algum rigor, ocorreu cerca de meio século mais tarde, em 1676, por um astrónomo dinamarquês de nome Ole Rømer, que trabalhava no Observatório de Paris. Este astrónomo levou a cabo um estudo sistemático de Io, uma das luas de Júpiter, que era eclipsada a intervalos regulares ao longo da sua órbita, a velocidade constante, em torno de Júpiter. Rømer descobriu que ao longo de alguns meses, os eclipses se *atrasavam* cada vez mais em relação ao período previsto para a ocorrência, mas alguns meses mais tarde esse atraso voltava a diminuir. Em setembro de 1676, foi capaz de prever corretamente que um eclipse previsto para 9 de novembro estaria 10 minutos *atrasado* face à hora prevista pelos astrónomos para a sua ocorrência. Foi o que realmente aconteceu, para grande surpresa dos seus colegas no Observatório Real de Paris. Duas semanas mais tarde, Rømer apresentou aos colegas as suas conclusões: à medida que a Terra e Júpiter se movem ao longo das suas órbitas, a distância entre estes dois corpos varia. A luz proveniente de Io (luz essa que é refletida do Sol) demora algum tempo a chegar à Terra, demorando mais tempo quando a Terra está a uma maior distância de Júpiter (e consequentemente de Io). Quando a Terra se encontra mais afastada de Júpiter, há uma distância extra igual ao diâmetro da órbita da Terra e que a luz tem que percorrer, em comparação com o momento em que os dois corpos se encontram mais próximos. Os eclipses observados e que ocorrem

¹ N. do T.: 1 milha = 1,609344 km

quando a Terra está a uma maior distância de Júpiter são os que se atrasam mais em relação ao período previsto para a ocorrência.

A partir das suas observações, Rvmer concluiu que a luz demora aproximadamente vinte e dois minutos a atravessar uma distância igual ao diâmetro da órbita da Terra. Esta estimativa é excessiva, e alguns anos mais tarde Newton escreveu no seu livro *Principia*²(*Livro I, secção XIV*):”É agora certo que, tendo em conta o fenómeno associado aos satélites de Júpiter, confirmado pelas observações de diferentes astrónomos, a luz propaga-se em sucessão³ e necessita de cerca de sete a oito minutos para percorrer a distância entre o Sol e a Terra.” Este é aproximadamente o valor correto.

Obviamente que para determinar a velocidade da luz era antes de mais necessário conhecer a distância entre a Terra e o Sol. Na década de 70 do século XVII foram realizadas tentativas para medir a paralaxe de Marte, isto é, quanto se *desviava* em relação às estrelas muito distantes visíveis no céu noturno, quando visto no mesmo instante de dois locais da Terra distintos. Este (muito pequeno) *desvio* podia ser utilizado para medir a distância de Marte à Terra e consequentemente a distância ao Sol, uma vez que as distâncias *relativas* entre os corpos do Sistema Solar já tinham sido estabelecidas pela observação e pela análise geométrica. De acordo com Michael Crowe (no livro *Modern Theories of the universe*, Dover, 1994, página 30), conclui-se que a distância da Terra ao Sol estava compreendida entre 40 e 90 milhões de milhas⁴. Pouco tempo depois, as medições convergiram para o valor correto de 93 milhões de milhas⁵, pois ao que parece Rvmer (ou talvez Huygens, utilizando os dados de Rvmer, pouco tempo depois) utilizou o valor correto para a distância, obtendo o valor de 125 000 milhas por segundo⁶ no cálculo da velocidade da luz. O valor calculado corresponde a cerca de três-quartos do valor correto de 186 300 milhas por segundo⁷. A diferença entre o valor calculado e o valor real deve-se ao facto de o cálculo da velocidade ter sido realizado com base na estimativa de Rvmer, que afirmava que a luz demorava vinte e dois minutos a atravessar uma distância igual ao diâmetro da órbita da Terra, quando esse cálculo deveria ter sido realizado com o valor correto de dezasseis minutos⁸.

Chuva e luz das estrelas

O próximo avanço substancial na determinação da velocidade da luz ocorreu em 1728, em Inglaterra. Um astrónomo, James Bradley, ao navegar no rio Tamisa com alguns amigos, reparou que o pequeno galhardete no topo do mastro mudava de posição, de cada vez que o barco ondulava, apesar de o vento ser constante. Comparou o barco ao planeta Terra em órbita, e o vento à luz proveniente de uma estrela distante, e concluiu que a aparente direcção em que *soprava* a estrela dependia da forma como a Terra se movia. Outra analogia possível consiste em imaginar a luz das estrelas como se fosse um aguaceiro num dia ventoso, e de imaginar que o corpo do observador (o seu) executa um movimento circular a velocidade constante. A aparente direcção da *chuva* não será vertical – maior será a quantidade que o atinge na face, em comparação com a quantidade que o atinge pelas costas. De facto, se a chuva cair a 15 milhas por hora⁹(mph), e se o seu corpo se move a 3 mph¹⁰, para si como observador, a chuva cai com inclinação, de modo que a sua velocidade vertical é de 15 mph, e a sua velocidade horizontal é de 3 mph no sentido do seu corpo. Se a inclinação da chuva é para norte ou para este ou qualquer outra direcção e sentido, em qualquer

² N. do T.: O nome completo do livro é *Principia Mathematica*.

³ Nota do autor: julgo que quererá dizer que a luz tem velocidade finita.

⁴ entre aproximadamente 64.4 milhões de km e 144.8 milhões de km.

⁵ aproximadamente 149.7 milhões de km.

⁶ 201 168 km por segundo.

⁷ aproximadamente 299 821 km por segundo.

⁸ N. do T.: O tempo necessário para que a luz do Sol chegue à Terra (e portanto percorrer uma distância igual ao raio da órbita do planeta) é de aproximadamente 8 minutos. Para a luz percorrer uma distância igual ao diâmetro da órbita do planeta (que corresponde ao dobro do raio, se se considerar a órbita da Terra aproximadamente circular), vai precisar de 8+8 minutos = 16 minutos.

⁹ aproximadamente 24.1 km por hora.

¹⁰ aproximadamente 4.83 km por hora.

instante de tempo essa inclinação depende da posição em que o seu corpo se encontra ao longo da órbita circular nesse mesmo instante. James Bradley concluiu que a aparente direção da luz proveniente das estrelas deve variar da mesma forma, embora a variação angular seja muito menos evidente. A velocidade orbital da Terra é de aproximadamente 18 milhas por segundo e, pelos estudos de Rømer, Bradley sabia que a luz se propagava a uma velocidade 10 000 vezes maior. Isso significava que a variação angular na aparente direção da luz proveniente das estrelas era semelhante à magnitude do ângulo menor de um triângulo retângulo, com um cateto 10 000 vezes maior que o outro, o que corresponde a um ângulo de $\frac{1}{200}$ de grau. Repare que este valor se encontra nos limites das medições de Tycho¹¹, mas o aparecimento do telescópio, com significativas melhorias ao nível da engenharia, tornaram possível a medição, com bastante precisão, deste pequeno ângulo, e Bradley foi capaz de determinar a velocidade da luz, atribuindo-lhe o valor de 185 000 milhas por segundo¹², com uma precisão de 1 por cento.

Lanternas cintilantes

O problema é que todas estas técnicas astronómicas não têm o mesmo apelo da ideia de Galileu de duas pessoas com lanternas na mão, suficientemente afastadas uma da outra para se determinar a velocidade da luz. Seria mais animador efetuar a determinação da velocidade de um feixe de luz entre dois pontos próximos da superfície da Terra, em vez de fazer deduções indiretas com base na aparente variação da posição das estrelas. Ainda assim, se duas lanternas estiverem colocadas a uma distância de dez milhas¹³ uma da outra, o intervalo de tempo que a luz demora a percorrer essa distância é da ordem de um centésimo de segundo, sendo por isso muito difícil de executar a experiência corretamente. Este problema técnico foi resolvido em França, por volta de 1850, por dois rivais, Fizeau e Foucault, que utilizaram técnicas diferentes. Na montagem de Fizeau, um feixe de luz passava pelos intervalos entre os dentes de uma roda dentada em movimento, de modo que a luz da *lanterna* ora estava visível, ora estava oculta. Em vez de utilizar outra lanterna a uma grande distância da primeira, Fizeau utilizou apenas um [espelho](#), que [refletia](#) a luz novamente para trás onde passava uma segunda vez pela roda dentada em movimento. A ideia era que o [raio de luz](#) que passou por um dos intervalos da roda dentada apenas seria capaz de regressar (depois de refletido pelo espelho) pelo mesmo intervalo se os dentes da roda não tivessem tido tempo para se mover significativamente durante a *viagem de ida e volta* do raio de luz entre a roda e o espelho. Não era difícil construir uma roda dentada com uma centena de dentes, ou fazê-la rodar centenas de vezes por segundo, por isso o tempo necessário para que os dentes da roda se movessem (e ocultassem os espaços inicialmente *vagos*) podia facilmente ser da ordem de $\frac{1}{10000}$ segundo. Este método resultou. O método de Foucault tinha por base a mesma ideia mas no lugar de uma roda dentada, Foucault utilizou um espelho rotativo. Em determinado momento, o raio de luz refletido pelo espelho rotativo era novamente refletido por um outro espelho que se encontrava a uma grande distância do primeiro, que por sua vez refletia o feixe de luz novamente para o espelho em rotação, e que entretanto havia rodado ligeiramente. Após esta segunda reflexão no espelho rotativo, a posição do feixe era cuidadosamente medida. A partir destes dados foi possível determinar a rotação do espelho durante a *viagem de ida e volta* entre o espelho rotativo e o espelho fixo, e uma vez que a velocidade de rotação do espelho era conhecida, foi possível determinar a velocidade da luz. Estas técnicas permitiram determinar a velocidade da luz com uma precisão de aproximadamente 1000 milhas por segundo.

Albert Abraham Michelson

Albert Michelson nasceu em 1852 em Strzelno, na Polónia. O seu pai, Samuel era um mercador judeu, profissão pouco segura na altura. As purgas de judeus eram frequentes nas cidades e vilas vizinhas e por isso a família decidiu abandonar a cidade. O quarto aniversário de Albert foi celebrado em Murphy's Camp, no Condado de Calaveras, cinquenta milhas a sudeste de Sacramento¹⁴, local onde cinco milhões de

¹¹ N. do T.: o autor refere-se a Tycho Brahe.

¹² aproximadamente 297 729 km por segundo.

¹³ aproximadamente 16.1 km.

¹⁴ N. do T.: nos EUA.

dólares de pó de ouro foram explorados de um lote de terra com uma área correspondente a apenas um-quarto de acre¹⁵. Samuel prosperou ao abastecer os mineiros da região. Quando a exploração de ouro chegou ao fim, os Michelson mudaram-se para a cidade de Virgínia, no Nevada, mais concretamente para Comstock lode, uma cidade com minas de prata. Albert frequentou o liceu em São Francisco e, em 1869, o seu pai tomou conhecimento de um anúncio num jornal local, que referia que o congressista Fitch apoiaria um candidato à Academia Naval de Annapolis, e que aguardava a apresentação de propostas. Albert apresentou a sua proposta, mas não conseguiu o seu apoio, que foi atribuído ao filho de um veterano da guerra civil. Contudo, Albert sabia que o Presidente Grant apoiaria também dez candidatos, e portanto viajou para leste no recentemente inaugurado caminho de ferro continental para tentar a sua sorte. O que Michelson desconhecia era que o congressista Fitch havia escrito diretamente ao presidente Grant em seu favor, afirmando que a aceitação de Albert na Academia poderia ser uma mais valia na tentativa de integrar os judeus do Nevada no partido republicano. Este argumento revelou-se persuasivo, pois na altura em que Michelson se encontrou com Grant, este já havia prometido apoiar dez estudantes mas, de algum modo, concedeu mais um apoio. De uma turma de noventa e dois alunos, quatro anos mais tarde apenas vinte e nove concluíram o curso. Michelson foi o melhor do curso a ótica, mas apenas o vigésimo quinto a náutica. O Superintendente da Academia, o Contra-Almirante Worden, que havia comandado o navio *Monitor* durante a sua vitória sobre o *Merrimac*, disse a Michelson: “Se de futuro prestares menos atenção a essas coisas científicas e mais à artilharia naval, poderá chegar uma altura em que saberás o suficiente para prestar algum serviço ao teu país.”

Navegando por mares silenciosos: Relatividade de Galileu

Pouco após a conclusão do curso, Michelson recebeu ordem de embarque no veleiro USS *Monongahela*, para uma viagem pelas Caraíbas até ao Rio de Janeiro. De acordo com a biografia de Michelson, escrita pela sua filha¹⁶, ele pensou bastante à medida que o barco navegava pelas águas calmas das Caraíbas sobre se de facto alguém fechado num quarto no interior do veleiro podia ou não afirmar que o barco se movia. De facto, a sua filha cita uma famosa passagem de Galileu:

[Salv.] Fecha-te com um amigo num quarto amplo por baixo do convés de um grande navio, e aí procura por mosquitos, moscas ou outras pequenas criaturas. Arranja um grande recipiente com água e coloca alguns peixes no seu interior; pendura uma garrafa de modo que, gota a gota, toda a sua água caia e entre pelo gargalo estreito de uma outra garrafa colocada imediatamente abaixo da primeira. Em seguida, com o barco ainda parado, observa como as pequenas criaturas voam, com uma determinada velocidade, em todas as direções do quarto; como os peixes nadam indiferentemente em todas as direções; e como as gotas de água todas caem na garrafa inferior. E se lançares algum objeto para o teu amigo, não é necessário exercer mais força numa direção do que na outra, se a distância a que ele se encontra for a mesma; e saltando com as duas pernas juntas, atingarás a mesma distância, quer saltes numa direção ou na outra. Depois de observadas estas situações, e ainda que nenhum homem duvide, desde que o navio permaneça parado, que devem ocorrer da forma descrita, faz agora o navio mover-se com a velocidade que desejares, desde que o movimento seja uniforme e o navio não balance neste sentido ou no outro. Não serás capaz de discernir a mais pequena alteração em todos os efeitos nomeados, nem concluir a partir de nenhum deles que o navio está em movimento ou está parado. ... ao lançar um objeto para o teu amigo, não será necessário arremessá-lo com mais força se ele estiver mais próximo da frente do navio do que tu... as gotas da garrafa superior continuam a cair na garrafa inferior apesar de o navio se ter movido muitos pés¹⁷ enquanto a gota se encontra em movimento de queda ... Esta correspondência de efeitos é devida ao facto de o movimento do navio ser comum a todas as coisas contidas no seu interior, inclusive o ar; quero dizer, se todas essas coisas estiverem fechadas num quarto; mas no caso de todas essas coisas estarem acima do convés, no exterior, e não obrigadas a seguir o curso do navio, seriam observadas diferenças, ... o fumo ficaria para trás... .

¹⁵ N. do T.: ¼ de acre corresponde a uma área de aproximadamente 1 012 m².

¹⁶ *The Master of Light*, de Doroty Michelson Livingston, Chicago, 1973

¹⁷ N. do T.: Atualmente 1 pé corresponde a 30.48 cm, mas ao longo do tempo a unidade sofreu alterações.

[SAGR.] Apesar de não me ter ocorrido a ideia de experimentar tudo isso enquanto estive no mar, tenho a certeza que estás correto. Lembro-me de estar na minha cabine a questionar-me centenas de vezes sobre se o navio estava ou não em movimento, e por vezes imaginava-o a mover-se num sentido quando de facto se movia no sentido oposto. Estou por isso convencido que nenhuma experiência realizada na cabine pode ajudar a determinar a velocidade, direção e sentido de um navio com movimento constante.

Parafraseei este último parágrafo para tentar clarificá-lo. Esta conclusão de Galileu, de que tudo permanece igual no interior de um quarto fechado que se move a velocidade constante em comparação com o mesmo quarto em repouso, designa-se de *Princípio da Relatividade de Galileu*.

Michelson determina a velocidade da luz

Ao regressar a Annapolis depois da viagem, Michelson foi promovido a Alferes, e em 1875 tornou-se instrutor de física e química na Academia Naval, sob as ordens do Tenente Comandante William Sampson. Michelson conheceu a sobrinha de Sampson, Margaret Hemingway, filha de um bem sucedido magnata de Wall Street, que construiu um castelo de granito em New Rochelle, Nova York. Michelson casou com Margaret em New Rochelle em 1877.

No que respeita ao trabalho, as demonstrações práticas nas aulas tinham acabado de ser introduzidas em Annapolis e Sampson sugeriu a Michelson que seria uma boa ideia demonstrar como determinar a velocidade da luz pelo método de Foucault. Michelson rapidamente percebeu, ao reunir o equipamento, que podia redesenhar a experiência para obter uma precisão muito maior, mas isso iria requerer dinheiro muito para além do que estava destinado à realização de demonstrações nas aulas. Resolveu conversar com o seu sogro, que concordou em investir dois mil dólares. Em vez de proceder como Foucault e colocar os espelhos a 60 pés de distância, Michelson colocou-os a 2 000 pés¹⁸ ao longo da margem do rio Severn, distância essa que mediu com uma precisão de um décimo de polegada¹⁹. Investiu em lentes e espelhos de elevadíssima qualidade para focar e refletir o feixe de luz. O seu resultado final foi de 186 355 milhas por segundo²⁰, com um erro possível de 30 milhas por segundo aproximadamente. Este resultado é vinte vezes mais preciso que o obtido por Foucault, tal como noticiou o New York Times, e Michelson tornou-se famoso enquanto ainda estava na casa dos vinte anos de idade. De facto, o valor por ele obtido para a velocidade da luz foi tido como o mais preciso ao longo dos quarenta anos seguintes, altura em que Michelson decidiu efetuar nova medição.

© Michael Fowler, Universidade de Virgínia

Casa das Ciências 2013

Tradução/Adaptação de Nuno Machado e Manuel Silva Pinto



¹⁸ aproximadamente 610 m.

¹⁹ N. do T.: 1 polegada = 2.54 cm.

²⁰ aproximadamente 299 909 km por segundo.