



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VII - PATOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

JULIO CÉZAR GALDINO GOMES

EVOLUÇÃO DA MEDIDA DA VELOCIDADE DA LUZ

PATOS
2024

JULIO CÉZAR GALDINO GOMES

EVOLUÇÃO DA MEDIDA DA VELOCIDADE DA LUZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de física do Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas da Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado(a) em física.

Área de concentração: História da física

Orientador: Prof. Dr. Thiago Brito Gonçalves Guerra

PATOS
2024

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

G633e Gomes, Julio César Galdino.
Evolução da medida da velocidade da luz [manuscrito] /
Julio César Galdino Gomes. - 2024.
33 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Exatas
e Sociais Aplicadas, 2024.

"Orientação : Prof. Dr. Thiago Brito Gonçalves Guerra,
Coordenação do Curso de Física - CCEA".

1. Velocidade da luz. 2. Medição da velocidade da luz. 3.
Experimentos. 4. História. I. Título

21. ed. CDD 535.24

JULIO CEZAR GALDINO GOMES

EVOLUÇÃO DA MEDIDA DA VELOCIDADE DA LUZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física

Aprovada em: 18/11/2024.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Érico Vinicius Bezerra Leite** (074.488.474-81), em **26/11/2024 20:14:15** com chave **27955ebeac4c11efbe381a1c3150b54b**.
- **Daniely Maria Oliveira da Silva** (700.674.784-84), em **26/11/2024 20:19:26** com chave **e1577c2eac4c11efa46a06adb0a3afce**.
- **Thiago Brito Gonçalves Guerra** (065.778.914-35), em **26/11/2024 20:18:23** com chave **bb77f5a6ac4c11efa4b106adb0a3afce**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QrCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Termo de Aprovação de Projeto Final

Data da Emissão: 26/11/2024

Código de Autenticação: 685cc8



Para todos aqueles
que foram expulsos
ou tiveram de sair de
casa por ser quem é,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Thiago Guerra, por ter aceito a responsabilidade de guiar minha jornada acadêmica. Aprecio profundamente o apoio e o incentivo que me foram concedidos. Ele dedicou-se incansavelmente à realização deste trabalho, oferecendo sua valiosa orientação desde a seleção do tema, que inicialmente me era desconhecido, até a busca minuciosa por materiais pertinentes. Suas respostas às minhas dúvidas, independentemente do dia ou horário, sempre foram acompanhadas de paciência e sabedoria. Sem sua presença e contribuição, a realização deste trabalho seria uma meta inalcançável. Dirijo meu reconhecimento à minha irmã, Maria Myrelly, cuja determinação e resiliência, mesmo diante da jornada exigente que é conciliar três empregos, permitiram-na encontrar sempre um espaço em sua agenda para me auxiliar nas correções gramaticais e semânticas deste texto. A vocês, expresso minha eterna gratidão.

“Luz, eu lhes mostrarei a luz.”
(Xavier)

RESUMO

A luz intriga a humanidade desde os primórdios do tempo. Na antiguidade clássica, os gregos já se perguntavam “o que é luz?”, “como enxergamos?”, eles estavam mais interessados em saber como a visão funcionava biologicamente, apesar disto, a partir desses questionamentos surge uma nova área da física, a óptica. Acreditava-se que a velocidade da luz era instantânea, com seu valor infinito, contudo, no decorrer da história humana, vários estudos foram realizados para descobrir sua finitude e o seu valor. Para ter uma visão minimamente abrangente dessa história, fez-se necessário investigar a evolução da óptica no decorrer dos anos, no que diz respeito à mensuração da velocidade da luz. Apesar de sua importância na física moderna, a velocidade da luz não recebe muito destaque. Nesse sentido, foi analisada a evolução da medida da velocidade da luz no período do século XVII ao século XX. Desse modo, este trabalho busca investigar as experiências realizadas acerca da medida da velocidade da luz e quais valores encontrados. Metodologicamente, usamos uma metodologia bibliográfica, onde buscamos levantar informações relevantes para a pesquisa. Ao final desta análise, percebe-se que a descoberta do valor da constante c não foi obtida via um único experimento, mas um processo gradativo que contou com a colaboração de vários métodos e cientistas.

Palavras-chave: Velocidade da Luz; Medida; Experimentos; História.

ABSTRACT

Light has intrigued humanity since the dawn of time. In classical antiquity, the Greeks were already asking themselves “what is light?”, “how do we see?” They were more interested in knowing how vision worked biologically. However, from these questions a new area of physics emerged: optics. It was believed that the speed of light was instantaneous, with its infinite value. However, throughout human history, several studies were carried out to discover its finiteness and its value. To have a minimally comprehensive view of this history, it was necessary to investigate the evolution of optics over the years, regarding the measurement of the speed of light. Despite its importance in modern physics, the speed of light does not receive much attention. In this sense, the evolution of the measurement of the speed of light was analyzed from the 17th to the 20th century. Thus, this work seeks to investigate the experiments carried out on the measurement of the speed of light and what values were found. Methodologically, we use a bibliographic methodology, where it seeks to gather relevant information for the research. At the end of this analysis, it is clear that the discovery of the value of the constant c was not obtained through a single experiment, but a gradual process that involved the collaboration of several methods and scientists.

Keywords: Speed Light; Measurement; Experiments; History.

SUMÁRIO

	Página
1 Introdução	9
2 A evolução das medidas da velocidade da luz	12
2.1 A velocidade da luz até o século XVII	12
2.1.1 A primeira tentativa de medir a velocidade da luz por Galileu	12
2.1.2 Ole Roemer e a primeira evidência da finitude da velocidade da luz	14
2.2 A velocidade da luz no século XVIII	16
2.2.1 James Bradley e a aberração estelar	16
2.3 A velocidade da luz no século XIX	18
2.3.1 Fizeau-Foucault e a primeira medida terrestre da velocidade da luz	18
2.4 A Velocidade da Luz no Século XX	22
2.4.1 Michelson e a medição da Velocidade da Luz entre o Monte Wilson e o Monte San Antonio	22
2.4.2 Louis Essen e a medida da velocidade da luz via cavidade ressonante	24
2.4.3 Keith Davy Froome e o valor da velocidade da luz usando um interferômetro de micro-ondas	25
2.4.4 Medições a laser da velocidade da luz por Evenson, Blaney e Woods	27
3 Considerações Finais	29
REFERÊNCIAS	30

1 Introdução

A velocidade da luz, denotada pela letra c , representa uma abreviação da palavra *celeritas* originada do latim, que significa “celeridade” ou “ligeireza”. No vácuo, c tem o valor de 299.792.458 m/s, a maior velocidade encontrada atualmente no universo (Folha de S.Paulo, 2002).

A velocidade da luz é uma das constantes mais importantes da física, ela se faz presente em diversos domínios, equações e definições da física, como: na mecânica clássica, onde ela é usada para definir a unidade metro. Na óptica, onde ela é utilizada para definir o índice de refração. Dentro da teoria do eletromagnetismo de Maxwell, ela relaciona eletricidade, magnetismo e óptica. Já na relatividade especial ou restrita, aparece em um dos postulados, nas equações que envolvem a dilatação do Tempo e a contração do espaço, sendo também a constante de proporcionalidade, que estabelece uma equivalência entre a massa e a energia. No âmbito da relatividade geral, a velocidade da luz aparece na métrica de Minkowski junto com o tempo, incorporando o tempo como uma quarta dimensão. Nas equações de Klein-Gordon e Dirac, que descrevem partículas sem e com spin, respectivamente, ela também aparece. Enquanto que na cosmologia, ela é usada para definir a unidade ano-luz, uma medida astronômica de espaço. Estes são apenas alguns exemplos, mas a velocidade da luz está presente em praticamente todos os campos da física moderna (Spence, 2019).

A luz vem sendo objeto de estudo desde os primórdios dos tempos e as primeiras investigações a respeito da luz foram na antiguidade clássica, onde alguns filósofos se perguntavam “o que é luz?”, “como enxergamos?”. A partir desses questionamentos, surgiu uma nova área conhecida como óptica, que de forma resumida estuda a luz e fenômenos luminosos, contudo vale ressaltar que os antigos não distinguiam o sentido da visão da luz.

Para os gregos, um fenômeno óptico podia ser analisado sob a perspectiva de três linhas de pesquisas: uma filosofia ou física, uma médica e uma matemática. Essas surgiram de base para toda a óptica até o início do século XVII. Segundo Lindberg:

Existiram três meios para classificar por completo o pensamento acerca da óptica para os gregos. A despeito de qualquer justaposição, essas três tradições parecem conter o grande corpo da óptica grega: uma tradição médica, concernente primariamente com a anatomia e a fisiologia do olho, e o tratamento das doenças do olho; uma tradição física ou filosófica, voltada para as questões epistemológicas, psicológicas e de causalidade física; e uma tradição matemática, dirigida principal-

mente para uma explicação geométrica da percepção do espaço. Posteriormente, quando a civilização grega entrou em declínio, essas mesmas três tradições foram transmitidas para o Islã e o cristianismo latino, que abasteceram tanto com estruturas quanto com materiais a ciência da óptica medieval. Portanto, para se compreender as teorias da visão da Idade Média e do Renascimento, devemos referir ao pensamento grego (Lindberg, 1976, p. 1).

Do ponto de vista físico, inúmeras teorias foram criadas para explicar a luz/visão, as que mais se destacaram foram a criada pelos atomistas, teoria de intromissão (ou recepção) e a teoria da emissão defendida por Aristóteles (384-322 a.C.) e Platão (427-347 a.C.).

Os atomistas acreditavam que os corpos emitem partículas que se desprendem da sua superfície e chegam aos nossos olhos. Para Platão, que seguia uma mesma linha de pensamento que Aristóteles e Empédocles (493-430 a.C.), o fogo que há dentro dos olhos emite partículas que tornavam os objetos visíveis. No *Timeu*, Platão concebe duas emanções: uma originada do olho e a outra do objeto visto, de modo que a imagem do objeto é formada no meio entre elas. Lindberg discorre que:

[...] o que se deve ter em mente é que a visão não resulta da união da emanção do objeto visível com a emanção do olho, mas do encontro da emanção do objeto com o “corpo homogêneo singular” formado pela união entre a emanção ocular e a luz do dia. Através desse encontro, os movimentos são transmitidos para a alma, produzindo, desse modo, a sensação (Lindberg, 1976, p. 5-6).

Na Grécia Antiga, acreditava-se que a luz viajava com velocidade infinita, hoje se sabe que a luz no vácuo viaja a uma velocidade constante, porém nem sempre foi assim. Ao longo da história filogenética da humanidade, diversos valores foram encontrados para a velocidade da luz.

O tema desta pesquisa está centrado na investigação das medidas obtidas para a velocidade da luz e não em um aparato histórico sobre a velocidade da luz — pois, como já foi mencionado antes, a história da luz está integrada à história da ciência, sobretudo a respeito da história da óptica — evidenciando os experimentos realizados por diversos físicos para tal constatação.

A partir desta constante, foi possível estabelecer diversas teorias, equações, definições e cálculos para a física moderna. Tendo o destaque dessa constante para vários estudos, a

ideia que centra as investigações desta pesquisa é: quais os experimentos foram realizados para obter a medida da velocidade da luz e os processos realizados para chegar a esta medida? Ao abordar o tema, busca-se entender como ocorreu a determinação da velocidade da luz e quais valores foram descobertos ao longo da história até chegar aos dias atuais.

A descoberta da velocidade da luz ajudou a descrever o seu comportamento no universo, sabe-se que atualmente a medida da velocidade da luz é de aproximadamente 3×10^8 m/s, contudo algumas outras medidas antecederam-na, e esta descoberta foi de extrema importância para os estudos do comportamento das partículas, entre outras teorias.

No entanto, nos cursos de graduação ou até mesmo no ensino básico, não é falado sobre esta linha evolutiva das medidas da luz. Desse modo, esta pesquisa justifica-se pela necessidade de trazer visibilidade ao tema devido à relevância da velocidade da luz, promovendo uma compreensão do caminho percorrido para mensurar este valor, de modo a contribuir para a disseminação científica.

À vista disso, este trabalho tem como objetivo geral investigar os experimentos realizados para a evolução da medida da velocidade de propagação da luz e tem como objetivos específicos: analisar e descrever os experimentos realizados para constatar a constante c ; entender quais os conceitos físicos, matemáticos e geométricos por trás de cada experimento; e procurar retirar a informação de tempo e espaço para realização do cálculo da velocidade. De modo metodológico, busca-se analisar fontes bibliográficas embasadas nas experiências de Galileu, Ole Roemer, James Bradley, entre outros.

Como este trabalho se concentra na investigação dos experimentos realizados para determinar a velocidade da luz, será adotada uma metodologia bibliográfica. Essa abordagem se concretizará na busca e análise de materiais de várias fontes, como livros, artigos acadêmicos, dissertações, revistas, entre outras, que discorrem sobre o assunto e que sejam de caráter relevante. Segundo Amaral (2007):

[...] é uma etapa fundamental em todo trabalho científico que influenciará todas as etapas de uma pesquisa, na medida em que der o embasamento teórico em que se baseará o trabalho. Consistem no levantamento, seleção, fichamento e arquivamento de informações relacionadas à pesquisa | (Amaral, 2007, p.1).

Ademais, a categoria é qualitativa, dedicada apenas na compreensão dos eventos, sem necessariamente firmar-se em dados estatísticos.

Inicialmente, a seção 2.1 discorrerá sobre a primeira prática experimental realizada para calcular a velocidade da luz, com Galileu Galilei, e a primeira medida obtida por Roemer, ambas no século XVII. A seção 2.2 aborda a medida obtidas por meio de observações astronômicas no século XVIII. A seção 2.3 disserta sobre a primeira medida terrestre no século XIX e na seção 2.4 as experiências realizadas durante o século XX.

2 A evolução das medidas da velocidade da luz

2.1 A velocidade da luz até o século XVII

2.1.1 A primeira tentativa de medir a velocidade da luz por Galileu

Havia uma grande discussão a respeito da velocidade da luz, muitos filósofos acreditavam que a luz era instantânea, como Aristóteles, Descartes e Heron de Alexandria, que “provou” que a luz era instantânea. No entanto, outros como Empédocles de Agrigento, Avicena e Alhazen declararam ser um movimento decorrente do tempo (Romer e Cohen, 1940).

Galileu Galilei, considerado um dos fundadores do método experimental na ciência moderna, realizou a primeira experiência para determinar a velocidade da luz. Em 1638, no livro Diálogos sobre duas ciências novas, publicado em Leyden, encontra-se um diálogo de Galileu com seus discípulos a respeito da velocidade da luz. No diálogo (De Angelis, 2002, p.34, tradução nossa), Galileu é representado por Salviati, Sagredo, seu amigo, e Simplicio representa a comunidade eclesiástica da época:

Sagredo: - Mas de que tipo e de que grandeza será o valor da velocidade da luz? É instantânea, ou como qualquer outro movimento, requer tempo? Podemos resolver este problema por meio de uma experiência?

Simplicio: - A experiência do dia a dia mostra-nos que a propagação da luz é instantânea; quando nós observamos a explosão de uma peça de artilharia, a uma grande distância, a luz atinge os nossos olhos sem intervalo de tempo; mas o som atinge os nossos ouvidos apenas depois de um pequeno intervalo de tempo.

Sagredo: A única coisa que posso inferir desta experiência familiar é que o som, ao chegar ao nosso ouvido, viaja mais lentamente que a luz; não me informa se a chegada da luz é instantânea ou se, embora extremamente rápida, ainda ocupa tempo. Uma observação deste tipo não nos diz nada mais do que aquela em que se afirma que “assim que o Sol atinge o horizonte a sua luz atinge os nossos olhos”; mas quem me garantirá que esses raios não atingiram esse limite antes de atingirem a nossa visão?

Salviati: O fato de estas observações e outras semelhantes não conduzirem a conclusões me fez pensar se seria possível verificar, sem cair em erro, se a propagação da luz é realmente instantânea. A comparação com a velocidade do som mostra que a propagação da luz é no mínimo muito rápida. Eu planejei o seguinte experimento.

O experimento planejado por Galileu, inicialmente, consistia que duas pessoas, Galileu e outro observador, frente a frente, a uma distância de alguns côvados - unidade usada por civilizações antigas que corresponde a 66 cm - cada um com uma lâmpada que pudesse ser coberta e descoberta, de modo que, ao Galileu descobrir sua lâmpada e a luz atingir a visão do outro observador, ele faria o mesmo, como mostra a Fig. 1. Após praticar

várias vezes com o propósito de descobrir a lâmpada, assim que perceber a luz da outra fonte, o mais rápido possível; os dois observadores repetiram o mesmo experimento a noite com uma distância de duas ou três milhas, observando se não há atraso na percepção da luz das lâmpadas comparado com curtas distâncias. O intervalo de tempo para Galileu descobrir a lâmpada e perceber a luz vinda da lanterna do outro observador, seria o tempo necessário para a luz percorrer uma distância entre dois observadores.

Figura 1 – Experimento das duas lanternas de Galileu.



Fonte: [Geocities.ws](https://www.geocities.ws), 2024

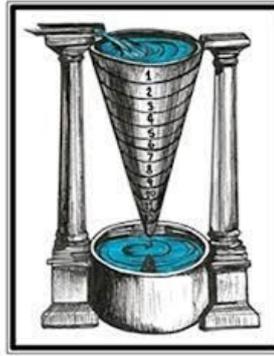
Galileu declara, ao final da discussão: *“Infelizmente, fiz o teste apenas a uma pequena distância, menos de um quilômetro, e por isso não consigo discernir se o aparecimento da luz oposta foi realmente imediato ou não. De qualquer forma, se não é imediato, é pelo menos muito rápido [...]”*

Galileu queria descobrir o tempo necessário para a luz percorrer aquela distância, mas usando o valor atual da velocidade da luz (299.792,458 m/s) e a distância (duas milhas ~ 3218,69 m) proposta por ele, tem-se que:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \rightarrow \Delta t = \frac{\Delta x}{v} \rightarrow \Delta t = \frac{3218,69 \text{ m}}{299.792,458 \text{ m/s}} \approx 10 \text{ ns.} \quad (2.1)$$

Naquela época, Galileu não tinha os equipamentos necessários para medir o tempo com precisão. É interessante destacar que o ponteiro de minutos começou a ser utilizado apenas em 1670, após a morte dele. O equipamento usado por ele foi um relógio d’água que consiste em dois recipientes que estão em diferentes níveis, um superior e um inferior. No topo, onde é colocada a água, ver Fig. 2, há um pequeno orifício por onde o fluxo da água é controlado, caindo no inferior, e uma escala de tempo. Conforme a água cai para o inferior, é possível medir o tempo. Ademais, o intervalo de tempo para a distância citada acima é de 10 ns, ou seja, o intervalo é muito rápido a ponto de Galileu não diferenciar se a luz é instantânea ou não.

Figura 2 – Clepsidra (relógio d'água)



Fonte: [\(Justforclocks, 2020\)](#)

2.1.2 Ole Roemer e a primeira evidência da finitude da velocidade da luz

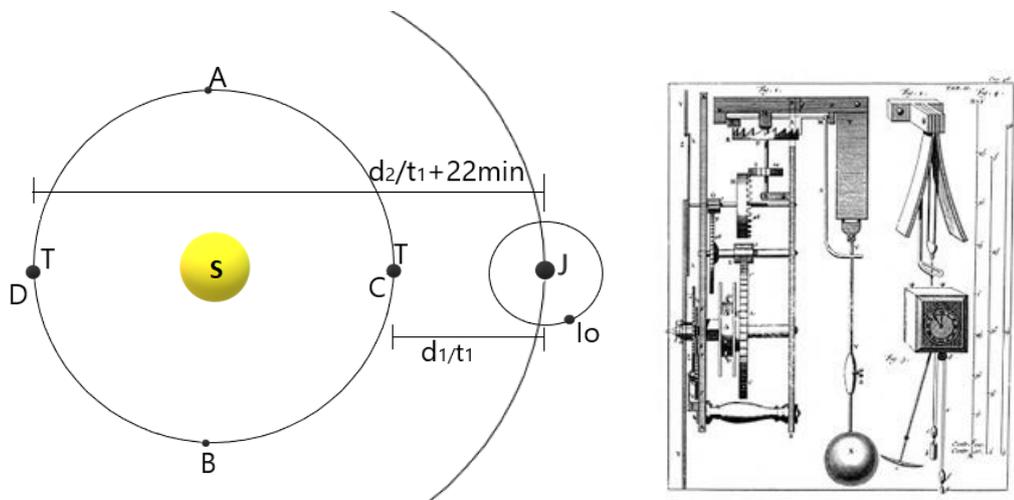
Os instrumentos ópticos evoluíram pouco desde Galileu, sendo que a primeira evidência da finitude da velocidade da luz foi encontrada por Ole Christensen Roemer, em 1676, por meio de observações astronômicas.

Roemer nasceu na cidade de Aarhus na Dinamarca, em 1644. Filho de comerciantes, apesar de não possuir muito dinheiro, conseguiu entrar na Universidade de Copenhague em 1662, estudou matemática e astronomia sob a tutoria de Erasmo, que lhe deu a tarefa de editar os manuscritos de Tycho Brahe.

Em 1676, Roemer notou que o tempo médio das imersões de Io (uma das quatro grandes luas de Júpiter) é menor que o tempo médio das emersões e, em setembro do mesmo ano, anunciou que o eclipse que ocorreria em 09 de novembro às 5h25min45s aconteceria com 10min de atraso em relação às observações feitas, ou seja, 5h35min45s. No dia 21 de novembro, Roemer apresentou para a academia um artigo que explicava que o atraso do eclipse ocorreu devido ao fato da luz ser finita e não infinita, também estipulou que a luz demora aproximadamente 22 min para atravessar o diâmetro da órbita terrestre. [\(Romer e Cohen, 1940\)](#)

Através da Fig. [3](#), pode-se compreender melhor a ideia de Roemer. O Sol é representado por S e Júpiter por J. Considerando a velocidade no sentido anti-horário, quando a Terra, T, se encontra em oposição, ponto C, ao observar uma imersão de Io, em um determinado tempo t_1 , e sendo a luz finita, nota-se que ela estará adiantada em relação a uma imersão observada com a Terra na posição A, pois a luz levará um tempo a mais para percorrer a distância CA. Da mesma forma, uma emersão de Io com a Terra em D, conjectura, estará atrasada em comparação com a Terra no ponto B.

Figura 3 – Esquema do modelo astronômico de Roemer para determinar a velocidade da luz.



(a) Modelo do sistema de Roemer

(b) Relógio de pêndulo de Huygens

Fonte: (a) Autoria própria. (b) Adaptado de [\(Cunha, 2019\)](#)

Roemer percebeu que o tempo do eclipse de Io não era exatamente 42,5 h, havia uma pequena variação no tempo observado do fenômeno, ao analisar diversas órbitas, ele notou que a maior diferença do período orbital de Io mais longo e o mais curto era de 22 min, ou seja, à medida que a Terra se afastava de Júpiter o período orbital de Io aparentava ser maior, do mesmo modo que quando a Terra se aproximava de Júpiter o período orbital parecia ser menor, assim ele observou que a variação do tempo de cada órbita sucessiva de Io, conforme a Terra se afastava, se acumulou até um máximo de 22 min, que corresponde ao tempo que a luz levaria para atravessar o diâmetro da órbita terrestre. Vale ressaltar que a distância é referente à posição da Terra ao longo da sua órbita e o tempo é em relação ao eclipse de Io observado naquela posição.

A ideia de Roemer não foi imediatamente aceita, pois as de Descartes prevaleciam naquela época, sendo severamente atacada. Contudo, em 1677, ele apresentou para a academia outro artigo onde demonstrou, por meio de novas observações, que a velocidade da luz é finita. Roemer não divulgou um valor para a velocidade da luz, ele propôs uma nova visão que contradiz a vigente na época, a da velocidade instantânea. Desse modo, mediante um cálculo simples, pode-se descobrir esse valor, temos que:

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} \quad (2.2)$$

Roemer descobriu que a luz leva 22 min para atravessar uma distância do tamanho do diâmetro da órbita terrestre, ou seja, 2 UA ¹.

¹Unidade astronômica é uma unidade de comprimento, aproximadamente a distância da Terra ao Sol.

$$c = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} = \frac{2 UA}{22 \text{ min}} \quad (2.3)$$

Em 1672, Cassini, Picard e Jean Richer, através das observações simultâneas, em Paris e Caiena, de Marte em oposição, determinaram uma paralaxe e por meio da terceira lei de Kepler, descobriram que $1 UA = 143.000.000 \text{ km}$. [\(Sterken, 2005\)](#)

$$c = \frac{2 \times 143.000.000.000 \text{ m}}{1320 \text{ s}} \approx 2,1 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.4)$$

A imprecisão do seu resultado deve-se ao erro do valor do raio da Terra, assim como o tempo que a luz leva para atravessar o diâmetro da órbita terrestre, o qual, atualmente, sabe-se que é menor.

2.2 A velocidade da luz no século XVIII

2.2.1 James Bradley e a aberração estelar

A teoria de Roemer sobre a velocidade da luz já havia sido bastante divulgada e, em 1728, James Bradley, um astrônomo real britânico, fez uma descoberta que colaborou para sua confirmação, a aberração estelar. Este fenômeno consiste no movimento aparente das estrelas devido à velocidade relativa da Terra.

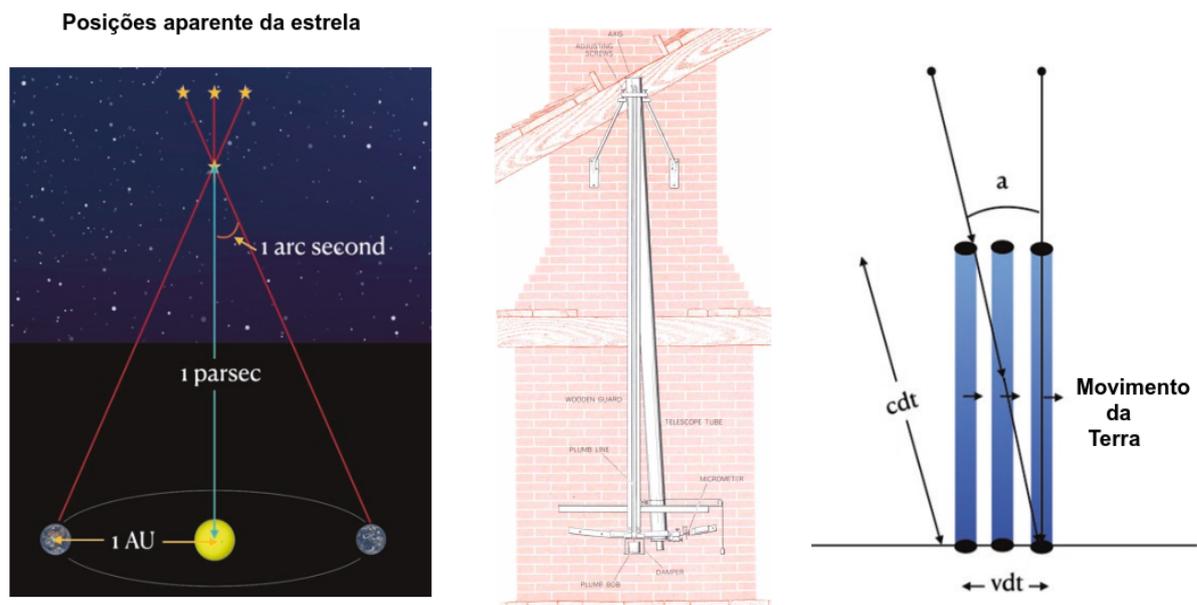
Em meados do século XVIII, muitos astrônomos acreditavam na teoria heliocêntrica, contudo a igreja católica acreditava na teoria geocêntrica. Os anti-copernicanos afirmavam que, se a Terra orbitasse o Sol, alguns fenômenos como a paralaxe seriam observados. Para provar a existência de paralaxe, Bradley e Molyneux resolveram refazer um trabalho de Robert Hooke.

Hooke era um mestre experimentalista e reconheceu a possibilidade de medir a oscilação ou paralaxe de uma estrela usando um telescópio vertical, que poderia estar alinhado exatamente devido à gravidade, permitindo a repetição de observações ao longo de vários meses para detectar alterações na posição de uma estrela. Por acaso, uma estrela relativamente brilhante, chamada γ -Draconis, podia ser vista em Londres. Hooke observou-a por vários meses, mas não obteve resultados satisfatórios. Embora alegasse ter medido a paralaxe da estrela γ -Draconis entre 27 e 30 segundos de arco.

Bradley revisitou os movimentos de γ -Draconis em 1728, no que se tornou um triunfo da técnica observacional para a “era dos telescópios longos”. Essas observações também provaram que a Terra estava se movendo pelo espaço ao detectar diretamente o deslocamento lateral da luz devido ao movimento da Terra. Esse fenômeno é conhecido como aberração estelar e é baseado no deslocamento das posições aparentes das estrelas conforme a direção da Terra em sua órbita muda ao longo das estações. A ideia, em poucas

palavras, é que a luz, ao viajar pelo comprimento de um telescópio de distância focal muito longa, como aqueles construídos no final do século XVII e início do século XVIII, será deslocada lateralmente pelo movimento da Terra. Essa quantidade de deslocamento resulta em um ângulo muito pequeno, mas mensurável, que é sensível à proporção da velocidade do movimento da Terra para a velocidade da luz, ver Fig. 4.

Figura 4 – Esquema representando a paralaxe, resultante do movimento da Terra ao redor do Sol. Telescópio de Bradley e uma ilustração mostrando o ângulo de aberração, a , que surge com o movimento da Terra e provoca uma leve alteração na aparência das estrelas.



Fonte: Adaptado de (Penprase, 2023).

Bradley, assim como Hooke, utilizou um telescópio vertical muito longo (24,5 pés de comprimento) para obter informações precisas da posição da estrela γ -Draconis, enquanto ela aparecia quase verticalmente. Com este dispositivo, foi possível medir as posições das estrelas em uma fração de arco de segundo. Bradley observou que as alterações nas posições das estrelas estavam intimamente relacionadas ao movimento da Terra, com as maiores alterações ocorrendo em estrelas que parecem ter uma direção perpendicular ao movimento da Terra. Ele calculou que a variação da posição das estrelas em um ângulo reto ao movimento da Terra era de 20,25 arcos de segundos, o que é muito próximo do valor atual, de 20,47 segundos de arco. Melhor ainda, Bradley conseguiu calcular a razão entre a velocidade da Terra e a velocidade da luz, que, a partir de suas observações, chegou a 1/10.200. Esse valor é muito próximo do valor atual de 1/10.000. Bradley não apenas confirmou o movimento da Terra, mas ajudou a medir a velocidade da luz, usando uma técnica mais precisa do que a medição anterior de Roemer com base nas luas de Júpiter (Penprase, 2023).

Na carta direcionada a Harley, lida na Royal Society nos dias 6 e 9 de 1729, Bradley conclui que “Finalmente conjecturei que todos os fenômenos até agora mencionados pro-

cediam do movimento progressivo da luz e do movimento anual da Terra em sua órbita. Pois percebi que, se a luz fosse propagada em tempo, a aparente posição de um objeto fixo não será a mesma quando o olho está em repouso, ou como quando se move numa direção qualquer que une a linha que passa pelos dois, olho e objeto; e quando o olho se move em diferentes direções, a aparente posição do objeto será diferente.”.

Usando as observações de 8 estrelas, Bradley calculou um valor médio de 20,25 de arcos de segundos (equivale a 0,00009817477 rad) para o ângulo de aberração da Terra com uma estrela que se encontrava perpendicular ao plano da órbita. Ele também provou que o ângulo máximo que a estrela pode se deslocar da sua posição real, a tangente do ângulo, é a razão entre a velocidade da Terra (v) e a velocidade da luz (c). Matematicamente, o ângulo de aberração, a , é dado por:

$$\tan(a) = \frac{v}{c} \rightarrow a = \text{arc tan} \left(\frac{v}{c} \right), \quad (2.5)$$

com isso,

$$c = \frac{v}{a} = \frac{30,2 \text{ km/s}}{0,00009817477 \text{ rad}} = 307614,675 \text{ km/s} \approx 3,08 \times 10^8 \text{ m/s}. \quad (2.6)$$

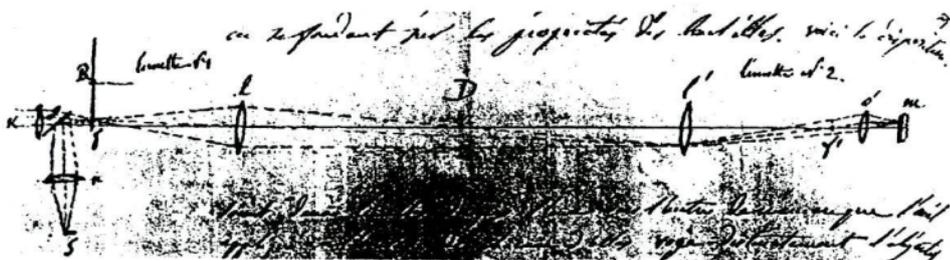
Assim, ele concluiu que o valor obtido, fornecido por suas observações, da velocidade da luz é o mais preciso descoberto até então. A descoberta de Bradley proporcionou uma prova clara para a teoria heliocêntrica, contribuiu para a precisão das medidas astronômicas e confirmou a teoria de Roemer a respeito da propagação da luz.

2.3 A velocidade da luz no século XIX

2.3.1 Fizeau-Foucault e a primeira medida terrestre da velocidade da luz

Hippolyte Louis Fizeau não utilizou a astronomia para descobrir a velocidade da luz, ele foi o primeiro a fazer um experimento terrestre. Em 23 de julho de 1849, Fizeau divulgou à Académie des Sciences uma descrição do seu experimento, método da roda dentada mostrado na Fig. 5, para descobrir a velocidade da luz.

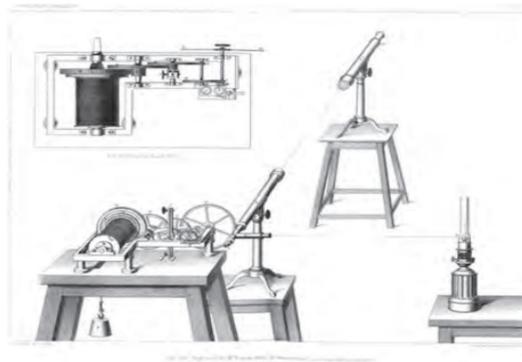
Figura 5 – Diagrama apresentado por Fizeau na Académie des Sciences.



O equipamento usado era constituído por duas partes: a primeira, continha um telescópio e um espelho plano; a segunda, era composta por uma roda dentada, uma fonte de luz, um telescópio, uma placa de vidro e uma lente.

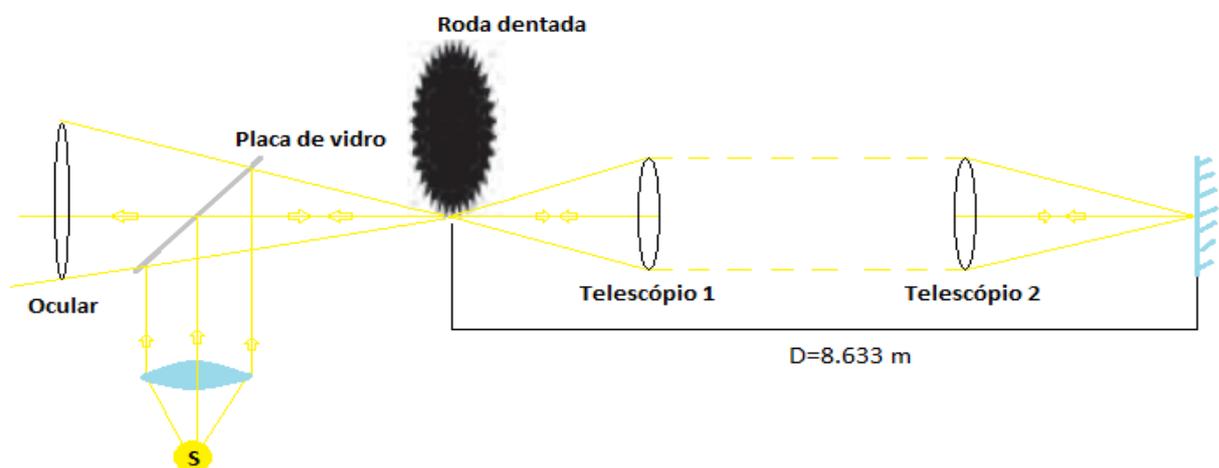
A Fig. 7 mostra de forma simplificada como era a experiência de Fizeau. Uma fonte lateral, S, tinha sua luz focalizada por meio de uma lente em uma placa de vidro inclinada a 45° em relação ao eixo. A placa reflete parte da luz para uma roda dentada, a qual é posicionada de modo a fazer seus dentes passarem pelo ponto de reencontro dos raios e, ao girar, a luz sucessivamente intercepte e passe entre os dentes ou não. A roda se encontra entre a lâmina de vidro e um telescópio 1, este direcionado para o telescópio 2. Um espelho plano colocado no foco do segundo telescópio reflete a luz de volta; parte da luz refletida passa novamente pela placa de vidro e pode ser observada por uma ocular. Na roda dentada havia um mecanismo que permitia a variação da sua velocidade, assim como um tacômetro e um cronômetro para saber a velocidade. Os dentes e lacunas tinham a mesma largura. O mecanismo da roda dentada pode ser visto na Fig. 6.

Figura 6 – Roda dentada com mecanismo de relógio de peso.



Fonte: (Lequex, 2020)

Figura 7 – Diagrama do experimento de Fizeau.

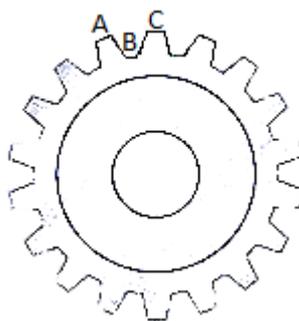


Fonte: Autoria própria

O experimento consistia em medir o tempo que a luz levaria para atravessar o caminho de ida e volta. A luz emitida era cortada pelos dentes da roda e o feixe refletido era observado; como a velocidade da luz é finita e a distância é considerável, o instante de emissão do raio é diferente do raio refletido. Fizeau procurava determinar o tempo e a velocidade com que ocorriam os eclipses.

Considerando a roda parada, a luz atravessa o espaço entre os dentes. Nesse caso, se a luz passa entre A e C, ela retorna também entre os mesmos dentes (Fig. 8). Se a roda começar a girar, o espaço B que a luz passou pode ser substituído pelo dente adjacente C, bloqueando o raio refletido, isso corresponde a um mínimo de intensidade. Também é possível haver velocidades em que a luz passa por um vão e retorna pela lacuna seguinte, um máximo de intensidade. Logo, a ocultação e o aparecimento da luz dependem da velocidade de rotação da roda.

Figura 8 – Roda dentada.



Fonte: Adaptado de [LFalcao \(2017\)](#)

Em 9 de fevereiro, Fizeau realizou o experimento a uma distância de 34 metros entre os dois telescópios, contudo essa distância foi pequena para obter resultados. Ele resolveu colocar o telescópio transmissor em Suresnes, na casa de seus pais, e o receptor em Montmartre, uma distância de 8.633 metros; Ele também tentou realizar com diversas fontes de luz, como lâmpada à óleo, lâmpada de éter, luz de Drummond e luz refletida por heliostato.

No entanto, apenas a luz de Drummond foi utilizada durante a noite e a luz do sol durante o dia. Em 12 de Abril, finalmente foi possível visualizar o feixe refletido. Após algumas melhorias, no dia 25, ele afirmou: *“Eu podia ver a olho nu um ponto muito brilhante entre as luzes de Montmartre. Acho que o veremos com uma lupa (ocular); após algumas tentativas feitas iluminando o campo, tenho certeza de que a experiência será bem-sucedida com o disco”*.

As primeiras tentativas ocorreram nos dias 26 e 30 de junho e no dia 3 de julho, usando uma roda com 997 dentes, ele encontrou um valor de 331.400 km/s para a velocidade da luz, porém esse resultado distanciava muito dos encontrados pelos astrônomos, então ele decidiu recomeçar novamente, mas com uma roda de 720 dentes. Nos dias 8 e 9 de

julho ocorreu a ocultação da luz a 12,6 revoluções por segundo, primeiro mínimo, para o dobro desse valor ocorre o primeiro máximo, para o triplo ocorre outro mínimo e assim sucessivamente.

Esses primeiros testes fornecem um valor para a velocidade da luz pouco diferente daquele aceito pelos astrônomos. A média deduzida das vinte e oito observações feitas até agora dá, para este valor, 70.948 léguas de 25 ao grau | (Fizeau, 1849, p.92, tradução

nossa)

A velocidade da luz percorre o caminho de ida e volta, ou seja, $2D$ dividida pelo tempo que leva para isso.

$$c = \frac{2D}{t} \quad (2.7)$$

O tempo está relacionado a roda giratória. A velocidade da roda dentada será $2\pi r f$, a circunferência multiplicado pela frequência, mas a distância entre os dentes é $d = \frac{2\pi r}{n}$, onde n é o número de dentes. Logo,

$$t = \frac{d}{v} = \frac{2\pi r}{2\pi n r f} = \frac{1}{n f} \quad (2.8)$$

Onde, r é o raio da roda, f a frequência em que ela gira e n é o número de dentes.

Mas Fizeau estava observando o tempo que a luz era eclipsada, ou seja, metade da distância entre dois dentes consecutivos. Nesse caso,

$$t = \frac{1}{2n f} \quad (2.9)$$

Portanto,

$$c = \frac{2D}{\frac{1}{2n f}} = 4Dn f \quad (2.10)$$

$$c = 4 \times 8.633 \text{ m} \times 720 \times 12,6 \text{ Hz} = 313.274 \text{ m/s} \approx 313.300 \text{ m/s} \quad (2.11)$$

Conforme o experimento citado, o valor encontrado é este citado acima, contudo, nos documentos da Académie des Sciences, Fizeau declarou que seu resultado foi uma média das 28 observações feitas, obtendo assim um valor de 70.948 léguas de 25 ao grau, convertendo esse valor obtemos:

$$1 \text{ légua de } 25 \text{ ao grau} \rightarrow 4.444,44 \text{ m}$$

$$70.948 \text{ léguas de } 25 \text{ ao grau} \rightarrow x$$

$$x = \frac{4.444,44 \text{ m} \times 70.948 \text{ léguas de } 25 \text{ ao grau}}{1 \text{ légua de } 25 \text{ ao grau}} = 315.324.129,12 \text{ m} \quad (2.12)$$

$$c = 3,15 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Ele sabia que não era o resultado mais preciso, mas ele ficou conhecido por realizar a primeira descoberta da velocidade da luz com um método puramente terrestre.

2.4 A Velocidade da Luz no Século XX

2.4.1 Michelson e a medição da Velocidade da Luz entre o Monte Wilson e o Monte San Antonio

Albert Abraham Michelson foi um físico germano-americano conhecido por seu trabalho sobre a medição da velocidade da luz e, especialmente, pelo famoso experimento Michelson-Morley. Em 1907, foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física, sendo o primeiro americano a receber o prêmio Nobel de uma ciência. Ele mediu a velocidade da luz entre Montes Wilson e San Antonio, na Califórnia, em 1926, utilizando um sistema de espelhos rotativos e fixos para calcular o tempo entre a ida e a volta de um feixe de luz (Michelson, 1927).

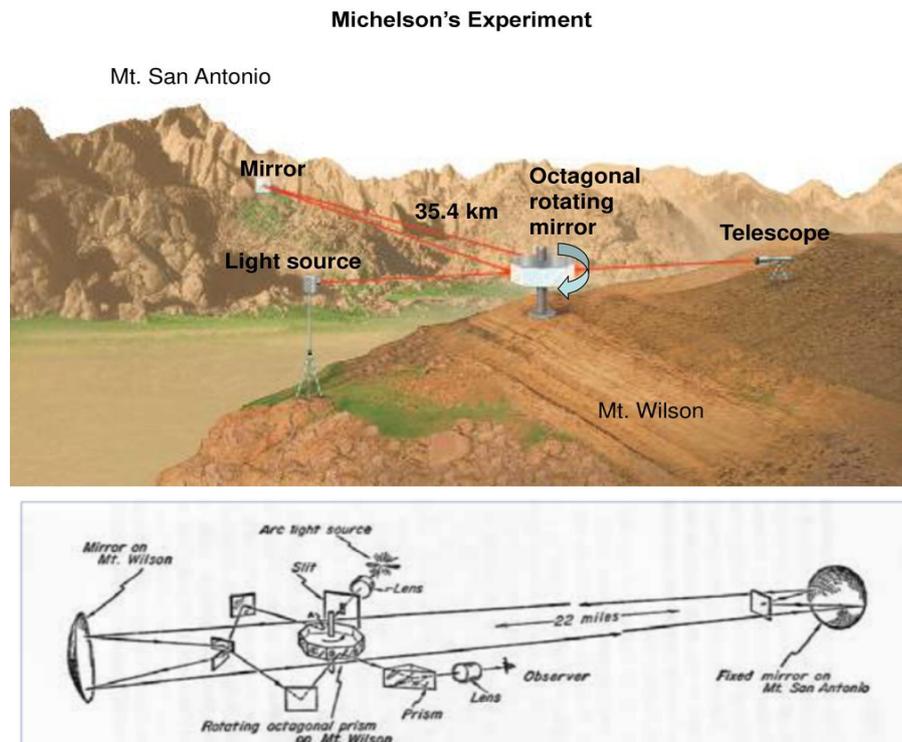
Conforme representado na Fig. 9, Michelson escolheu duas montanhas que se encontram a aproximadamente 35 km de distância, o Monte Wilson e San Antonio, garantindo uma distância longa e constante para aumentar a precisão da medição. Ele emitiu um feixe de luz do Monte Wilson que se dirigia ao Monte San Antonio, onde um espelho fixo refletia o feixe de luz. Ele também instalou, no Monte Wilson, um espelho rotativo com uma alta velocidade angular. Essa alta rotação permitia que o feixe refletido fosse direcionado em um novo ângulo, permitindo a observação de um deslocamento angular, devido ao tempo que a luz levava para ir e voltar. Com isso, ele calculou, a partir da velocidade de rotação do espelho e da variação do ângulo do feixe refletido, o tempo que a luz levaria para percorrer os Montes. Uma vez que a distância entre os Montes era conhecida ($2d$), ele dividiu essa distância pelo tempo que a luz leva para ir e voltar (t), obtendo, assim, a velocidade da luz, ou seja:

$$c = \frac{2d}{t}, \quad (2.13)$$

O tempo que a luz leva para ir e voltar, está diretamente ligado à velocidade de rotação do espelho (ω) e ao deslocamento angular (θ) nesse intervalo. Em particular:

$$t = \frac{\theta}{\omega}, \quad (2.14)$$

Figura 9 – Esquema representando como Michelson, mediu a velocidade da luz



Fonte: Adaptado de [\(Eklund, 2015\)](#).

Um relatório preliminar sobre as medições da velocidade da luz realizadas no Monte Wilson revelou que a velocidade no ar alcançou 299.735 km/s, enquanto a velocidade no vácuo alcançou 299.802 km/s. O método é basicamente este: um feixe de luz é refletido no Monte Wilson por uma das superfícies de um espelho octogonal girando em torno de um eixo vertical. Ele percorreu cerca de 35 quilômetros até o Monte San Antonio, onde foi refletido de volta para o Monte Wilson. Aqui, ela incide na próxima face do espelho octogonal, mantendo-se a velocidade de rotação constante no valor adequado para tornar isso possível, no caso, 528 revoluções por segundo. Dessa forma, em um oitavo de 1/528 segundo, a luz percorre o dobro da distância de 35.425,5 m, ou seja, a uma velocidade de 299.266 quilômetros por segundo.

$$c = \frac{2 \times 35,4255 \text{ km}}{\frac{1}{8} \times \frac{1}{528} \text{ s}} \approx 299.735 \text{ km/s.} \quad (2.15)$$

O valor médio com um espelho de vidro de doze faces, foi 299.729 km/s; com um espelho de vidro de dezesseis faces, 299.736 km/s; uma segunda série com o mesmo espelho, resultou em 299.722 km/s; com um espelho de aço de doze faces, 299.729 km/s; com um octógono de aço, 299.728 km/s. A concordância dos resultados é impressionante mesmo quando usamos espelhos com diferentes números de faces e materiais:

- Vidro, 8 lados, 299.797 km/s.

- Aço, 8 lados, 299.795 km/s.
- Vidro, 12 lados, 299.796 km/s.
- Aço, 12 lados, 299.796 km/s.
- Vidro, 16 lados, 299.796 km/s.

O valor final fornecido é 299.796 km/s | (Michelson, 1927)

2.4.2 Louis Essen e a medida da velocidade da luz via cavidade ressonante

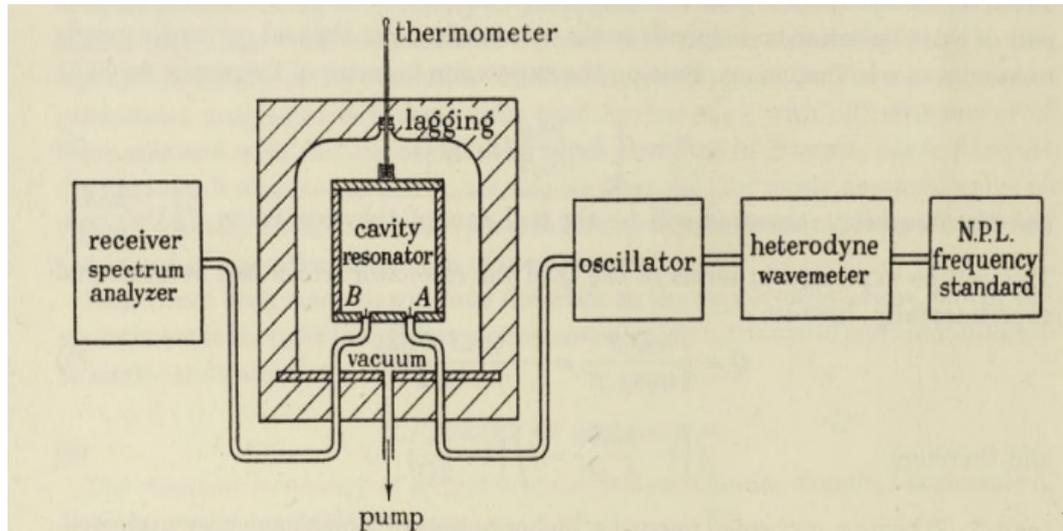
James Maxwell, em 1865, desenvolveu a teoria eletromagnética, que pode ser resumida em quatro equações denominadas Equações de Maxwell. Essas equações presumem que as ondas eletromagnéticas viajam pelo espaço com uma velocidade constante que coincidentemente é a velocidade da luz, ou seja, a luz é uma onda eletromagnética, assim como ondas de rádios, raios-x, entre outros.

A tecnologia já havia evoluído consideravelmente no século XX e durante a Segunda Guerra Mundial foi preciso construir radares com bastante precisão, pois era necessário detectar aviões inimigos, direcionar bombas e o radar também servia para medição de distâncias, para o estudo da geodésia. Após realizar diversas experiências com radares, o exército americano percebeu que poderia existir um erro no valor aceito para a velocidade da luz.

Louis Essen, físico britânico, foi o primeiro a perceber que a medida de c utilizada durante a Segunda Guerra Mundial estava incorreta. Esse valor era crucial, uma vez que a Força Aérea Real Britânica dependia dele para auxiliar na navegação.

Essen realizou medições altamente precisas da velocidade da luz em 1950, utilizando uma cavidade ressonante de micro-ondas (uma câmara metálica) que ressoava em frequências específicas de micro-ondas. O experimento de Essen consistiu em injetar um sinal de um oscilador de micro-ondas de frequência variável em um cilindro de cobre fechado e oco e anotar a frequência na qual a ressonância ocorreu na cavidade. Sabendo disso e das dimensões exatas da cavidade, a velocidade da luz pôde ser calculada. Um diagrama do equipamento que ele usou em seus experimentos é mostrado na Fig. 10.

Figura 10 – Esquema representando o experimento da cavidade ressonante de Essen.



Fonte: (Essen, 1950).

Usando esse aparato, a velocidade da luz (v_0), podia ser encontrada através da seguinte expressão:

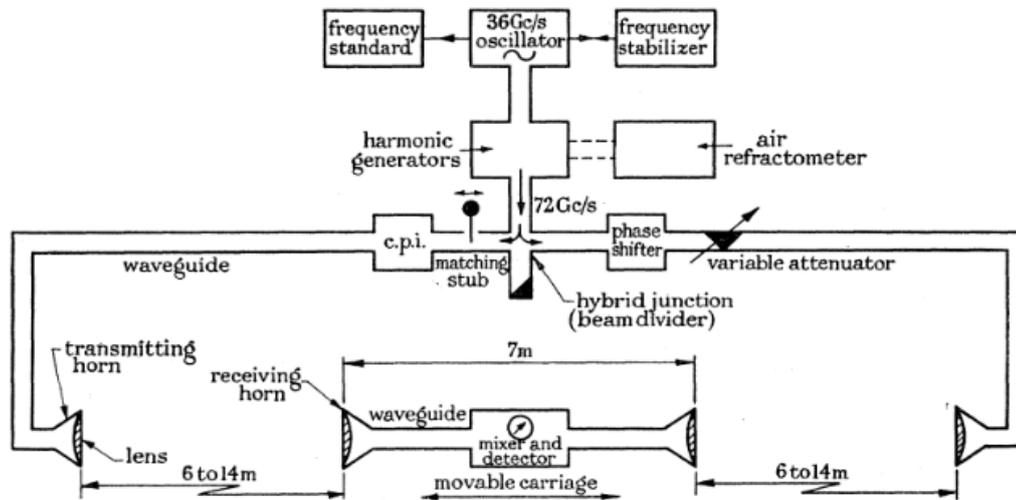
$$v_0 = \frac{f_{lmn} (1 + 1/2Q)}{\sqrt{(r/\pi D) + (n/2L)}} \quad (2.16)$$

onde, f_{lmn} é a frequência encontrada no ressonador, D é o diâmetro, L é o comprimento, n é o número inteiro de meio comprimento de onda, Q é o fator de qualidade medido do ressonador. O valor médio de velocidade a que Essen chegou foi de 299.792 km/s.

2.4.3 Keith Davy Froome e o valor da velocidade da luz usando um interferômetro de micro-ondas

Keith Davy Froome nasceu em Constantinopla, Turquia, em 1921. Seu pai era um capitão do exército britânico encarregado de um depósito de munição. A família dele se mudou para Londres aos dezoito meses. Ele concluiu o curso de Física na Universidade College London. De 1945 a 1947, Froome estudou no Imperial College London, onde recebeu seu PhD. Ele se juntou ao National Physical Laboratory (NPL) em 1949. Em 1951, ele começou sua colaboração com o Dr. Essen no estudo de índices de refração para o ar em frequências de rádio e micro-ondas. Froome foi promovido a Diretor Científico Adjunto do NPL em 1969. Em 1958, usou um interferômetro de micro-ondas, Fig. II, para medir a velocidade das ondas eletromagnéticas a uma frequência de 72,006 GHz, um comprimento de onda de aproximadamente 4 mm.

Figura 11 – Esquema representando o interferômetro de Froome com 72 GHz



Fonte: (Froome, 1958).

O sinal de micro-ondas foi gerado por um oscilador de 36 GHz e aumentado para 72 GHz usando um gerador harmônico. Seguindo o gerador harmônico, o sinal de 72 GHz foi dividido em dois feixes, cada um viajando por guias de onda idênticos para cornetas transmissoras espaçadas a 27 metros de distância. Um carro móvel de sete metros, suportando duas cornetas receptoras, um misturador e um detector, foi colocado entre as duas cornetas transmissoras, conforme ilustrado na Fig. 11. A movimentação do carro altera o comprimento dos feixes, criando padrões de interferência quando os sinais recebidos foram misturados. Mínimos ocorreram nos padrões de interferência com cada deslocamento de meio comprimento de onda do carro. O carro foi movido por 970 meias ondas (aproximadamente 2 m) e a distância entre os mínimos foi medida. O valor do comprimento de onda assim obtido, 4,163 mm, foi multiplicado pela frequência de 72,006 GHz do sinal para fornecer a velocidade de fase, calculada por,

$$v = \lambda \times f \quad (2.17)$$

onde,

v - a velocidade do sinal de micro-ondas medido,

f - a frequência do sinal de micro-ondas e,

λ - o comprimento de onda medido do sinal derivado dos padrões de interferência.

Os resultados de Froome são resumidos na tabela 2.1.

Portanto, o valor médio de $c = 299.792,501 \pm 0,059 \text{ km/s}$.

Tabela 2.1 – Tabela resumindo os resultados de Froome.

Separação entre as cornetas de transmissão e recepção (cm)	Velocidade (km/s)
629,5	299.792,513
751,5	299.792,529
875,0	299.792,476
999,0	299.792,414
1.120,5	299.792,478
1.247,5	299.792,588
1.367,5	299.792,512

Fonte: Froome, 1958

2.4.4 Medições a laser da velocidade da luz por Evenson, Blaney e Woods

As primeiras determinações da velocidade da luz, baseadas em observações astronômicas ou experimentos terrestres, foram amplamente substituídas na década de 1940 por medições da frequência e comprimento de onda da radiação de micro-ondas. Os resultados foram limitados pela incerteza nas medições de comprimento de onda, e era aparente que maior precisão poderia ser alcançada usando radiação de comprimento de onda menor. Foi somente com o desenvolvimento dos lasers e das técnicas ópticas não lineares, possibilitadas por suas altas intensidades de saída, que as medições de frequência puderam ser estendidas para a região visível do espectro (Woods, 1975).

Antes do advento dos lasers, a luz infravermelha e visível eram medidas em termos de seus comprimentos de onda (λ) com um alto grau de precisão. No entanto, a frequência (f) da luz sendo medida só poderia ser determinada multiplicando seu comprimento de onda pelo valor então aceito para a velocidade da luz (c), ou seja,

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.18)$$

O desenvolvimento de lasers ofereceu a possibilidade de medir diretamente a velocidade da luz. Um laser fornece uma fonte de frequência coerente que, em teoria, permite que tanto seu comprimento de onda quanto sua frequência sejam medidos. Infelizmente, a tecnologia para medir diretamente frequências no espectro infravermelho e visível não estava disponível. No final da década de 1970, Kenneth Evenson e seus colegas (Evenson, 1972) do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) em Boulder, Colorado, resolveram esse problema.

Usando um laser He-Ne estabilizado com metano, Evenson e sua equipe mediram com sucesso tanto o comprimento de onda quanto a frequência do laser, sendo o produto dos dois a velocidade da luz. O valor que eles obtiveram foi 299.792.458,0 m/s $\pm 4 \times 10^{-9}$, cem vezes mais preciso do que o valor aceito anteriormente. Ou seja, seu valor foi medido com duas casas decimais adicionais.

Na tabela abaixo são mostrados os resultados dos experimentos que usaram o laser para medir a velocidade da luz, cada um deles usando técnicas diferentes.

Tabela 2.2 – Método do laser

Ano	Experimentador	Laser	Molécula	λ (μm)	f (MHz)	c (m/s)
1972	Evenson	He-Ne	CH ₄	3,39223139	88.376.181,627	299.792.457
1974	Blaney	CO ₂	CO ₂	9,317246348	32.176.079,482	299.792.459
1976	Woods	He-Ne	Ne	0,63299147	481.214.388,055	299.792.459

Fonte: Woods, 1976

O valor atual da velocidade da luz veio da reformulação do metro. Em 1889, o metro foi definido com base em um protótipo internacional de platina, que em 1960, na 11^a conferência, o Comitê Consultivo para a Definição do Metro redefiniu como sendo o comprimento de onda no vácuo de Criptônio 86, Kr86. Na 17^a conferência, em 1983, o Comitê Consultivo para a Definição do Metro recomendou para uso geral o valor de $299.792.458 \pm 1,2$ m/s para o valor da velocidade da luz. O metro passou a ser formulado a partir de uma constante fundamental da natureza.

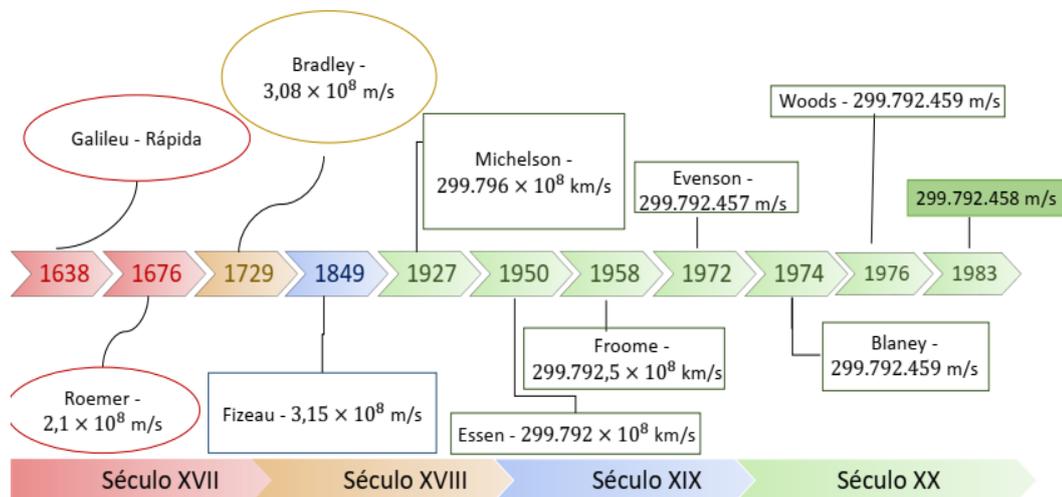
3 Considerações Finais

A velocidade da luz é uma célebre constante fundamental da natureza, sendo de notável relevância para medições práticas, como distância geofísica que usa radiação eletromagnética modulada, medições astronômicas, como também radar planetário de micro-ondas e alcance lunar a laser. A velocidade da luz está presente na teoria eletromagnética - relacionando unidades eletrostáticas e eletromagnéticas - e na teoria atômica. Ademais, relaciona a massa de uma partícula à sua energia, equação muito importante para a relatividade.

Após esta análise a respeito da evolução da velocidade da luz e das descrições dos experimentos, é inquestionável que a taxa de propagação da luz não foi descoberta por um único método ou experimentador, mas sim por vários cientistas ao longo da história.

À medida que a ciência e tecnologia avançavam, houve um aperfeiçoamento dos equipamentos e aparelhos, permitindo o aperfeiçoamento das técnicas, aumento da precisão e o desenvolvimento de novos métodos experimentais. A Fig. 12/tabela 3.1, mostra uma linha do tempo que evidencia a evolução desta medida:

Figura 12 - Linha do tempo



Fonte: Autoria própria

Ainda que a velocidade da luz seja de extrema importância na área da física, pouco se sabe sobre a história dessa medida, pois, quando mencionada, falam somente sobre a origem grega da palavra e o seu valor atual. A realização desta pesquisa mostrou uma grande limitação de material, destacando que há uma grande ausência de material didático na língua portuguesa. Portanto, acredita-se que o objetivo desta pesquisa foi atingido, dado que expôs uma descrição de forma breve e simples sobre as experiências e métodos que mensuraram este valor, de modo a contribuir com a disseminação deste saber científico.

Tabela 3.1 – Evolução da medida da velocidade da luz

Ano	Experimentador	Método experimental	Velocidade da luz (m/s)
1638	Galileu	Experimento com as duas lanternas	Rápida
1676	Roemer	Eclipses da Lua de Júpiter	$2,1 \times 10^8$
1729	Bradley	Aberração estelar	$3,08 \times 10^8$
1849	Fizeau	Roda dentada	$3,15 \times 10^8$
1927	Michelson	Espelho rotatórios	$2,99798 \times 10^8$
1950	Essen	Ressonador de micro-ondas	$2,997925 \times 10^8$
1958	Froome	Interferômetro de micro-ondas	$2,997925 \times 10^8$
1972	Evenson	Laser	299.792.457
1974	Blaney	Laser	299.792.459
1976	Woods	Laser	299.792.459
1983	CCDM		299.792.458

Fonte: Autoria própria

REFERÊNCIAS

- AMARAL, J. J. F. **Como fazer uma pesquisa bibliográfica**. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, 2007. Disponível em: <http://200.17.137.109:8081/xiscanoe/courses-1/mentoring/tutoring/Como%20fazer%20pesquisa%20bibliografica.pdf>. Acesso em: 30 set. 2024.
- CUNHA, Sidney. **Pendulov23**, 2019.
- DE ANGELIS, Alessandro. **Galileo Galilei's "Two New Sciences": for Modern Readers**. Springer Nature, 2022.
- EKLUND, Bob. **Happy birthday, albert Michelson. Reflections**. 2015.
- ESSEN, Louis. **The velocity of propagation of electromagnetic waves derived from the resonant frequencies of a cylindrical cavity resonator**. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, v. 204, n. 1077, p. 260-277, 1950.
- EVENSON, K. M. et al. **Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser**. Physical Review Letters, v. 29, n. 19, p. 1346, 1972.
- FIZEAU, Hippolyte. **Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière**. Comptes rendus, v. 29, p. 90-92,132, 1849.
- Folha de S.Paulo - **Física: "Celeritas" e a velocidade da luz no vácuo** - 04/04/2002. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff0404200241.htm>. Acesso em: 18 out. 2024.
- FROOME, K. D. **A new determination of the free-space velocity of electromagnetic waves**. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, v. 247, n. 1248, p. 109-122, 1958.
- FRERCKS, Jan. **Creativity and technology in experimentation: Fizeau's terrestrial determination of the speed of light**. Centaurus, v. 42, n. 4, p. 249-287, 2000.
- KOSSOVSKY, Alex Ely. **The birth of science**. Springer Nature, 2020.
- LAPORTE, Rafael Sobrinho. **Ole Roemer e a velocidade da luz: explorando aspectos da natureza da ciência em uma proposta de ensino**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

- LEQUEUX, James. **Hippolyte Fizeau: Physicist of the Light**. Edp sciences, 2020.
- LFALCAO. **movimento circular**, 2017. Disponível em: <https://www.tutorbrasil.com.br/forum/viewtopic.php?t=57595>. Acesso em: 27 set. 2024.
- LINDBERG, D. C. **Theories of vision from Al-Kindi to Kepler**. Chicago/London: University of Chicago Press, 1976.
- MICHELSON, Albert Abraham; PEARSON, F. No. 329. **Measurement of the velocity of light between Mount Wilson and Mount San Antonio**. Contributions from the Mount Wilson Observatory/Carnegie Institution of Washington, vol. 329, pp. 1-22, v. 329, p. 1-22, 1927.
- PENPRASE, Bryan E. **Models of Time and Space from Astrophysics and World Cultures: The Foundations of Astrophysical Reality from Across the Centuries**. Springer, 2023.
- PhysicsHigh. **History of the speed of light and how its speed was determined**. Youtube, 19 de abr. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=jUHgIYNEzJQ>. Acesso em: 04 de set. 2024.
- ROMER, M.; COHEN, I. Bernard. **Roemer and the First Determination of the Velocity of Light (1676)**. Isis, v. 31, n. 2, p. 327-379, 1940.
- ROWLEY, W. R. C. et al. **Laser wavelength measurements and the speed of light**. Optical and Quantum Electronics, v. 8, p. 1-14, 1976.
- SEMAY, Claude et al. **c at the belfry**. Physics Education, v. 53, n. 3, p. 035015, 2018.
- SETTERFIELD, Barry. **History of the Speed of Light Experiments – Part 3: Fizeau and the Toothed-Wheel Experiments**. GENESSIS SCIENCE RESEARCH, 2013. Disponível em: <https://www.barrysetterfield.org/cx3.html>. Acesso em: 04 set. 2024.
- SILVA, Rui Miguel Moreira da. **Experiências históricas para a determinação da velocidade da luz**. 2002.
- SPENCE, John CH. **Lightspeed: the ghostly aether and the race to measure the speed of light**. Oxford University Press, 2019.
- STERKEN, Christiaan. **Ole Roemer and the Light-Time Effect**. In: The Light-Time Effect in Astrophysics: Causes and cures of the OC diagram. 2005. p. 181.
- TOSSATO, C. R.. **A função do olho humano na óptica do final do século XVI**. Scientiae Studia, v. 3, n. 3, p. 415-441, jul. 2005.

VALIDO FILHO, Manoel Messias Pereira et al. **Medidas da velocidade da luz usando observações e simulações astronômicas das luas de Júpiter**. 2016.

Velocidade da luz. Disponível em: <https://www.geocities.ws/saladefisica5/leituras/vluz.html>. Acesso em: 22 de jul. de 2024.

Water Clocks: The biggest phenomena of time keeping. Justforclocks, 2020. Disponível em: <https://blog.justforclocks.com/water-clocks-the-biggest-phenomena-of-time-keeping/>. Acesso em: 22 de jul. de 2024.