

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

Las investigaciones y experimentos históricos que llevaron a la determinación de la velocidad de la luz: parte 2

The historical investigations and experiments that led to the determination of the speed of light: parte 2

DOI: 10.22481/rbba.v15i1.16766

Luan Santos Lemos
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Bahia, Brasil
Id. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9056768052086282>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2414-4191>
Endereço eletrônico: luan.santoslemos144@gmail.com

Carlos Takiya
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Bahia, Brasil
Id. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6591206454491954>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2222-3198>
Endereço eletrônico: takiya@uesb.edu.br

RESUMO

Neste segundo artigo continuamos o percurso histórico iniciado na parte 1, o momento que estamos destacando é o período da descoberta em si, e não daremos prosseguimento com o período pós-descoberta, que é caracterizado pelo refinamento do valor da velocidade da luz, que é hoje uma das constantes da natureza mais importante usada na ciência. Vimos que foram os cálculos do astrônomo dinamarquês que o levou a uma estimativa do tempo de atraso dos eclipses do satélite Io de Júpiter. Apesar de estar com esse dado em mãos, foi Huygens quem efetivamente calculou a velocidade da luz pela primeira vez na história. Veremos também como foi a repercussão dessa descoberta,

Publicado sob a Licença Internacional – CC BY

ISSN 2316-1205	Vit. da Conquista, Bahia, Brasil / Santa Fe, Santa Fe, Argentina	Vol. 15	Num.1	e16766	p. 1-25
----------------	--	---------	-------	--------	---------

Submissão: 12/01/2025 Aprovação: 05/04/2025 Publicação: 01/05/2025

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

sabemos que mesmo sendo a finitude da velocidade da luz uma afirmação baseada em fatos, nem todos os estudiosos europeus aceitaram rapidamente esse resultado facilmente.

Palavras-chave: cálculo da velocidade da luz; dados de Roemer; Huygens; satélite Io; efemérides dos satélites de Júpiter.

RESUMEN

En este segundo artículo continuamos el recorrido histórico iniciado en la parte 1, el momento que destacamos es el periodo del descubrimiento en sí, y no continuaremos con el periodo post-descubrimiento, que se caracteriza por el refinamiento del valor de la velocidad de luz, que es hoy una de las constantes de la naturaleza más importantes utilizadas en la ciencia. Vimos que fueron los cálculos del astrónomo danés los que le llevaron a estimar el tiempo de retraso de los eclipses en el satélite Io de Júpiter. A pesar de tener estos datos en la mano, fue Huygens quien calculó la velocidad de la luz por primera vez en la historia. También veremos cómo tuvo impacto este descubrimiento. Sabemos que aunque la finitud de la velocidad de la luz es una afirmación basada en hechos, no todos los estudiosos europeos aceptaron rápidamente este resultado.

Palabras-clave: cálculo de la velocidad de la luz; datos de Roemer; Huygens; satélite Io; efemérides de los satélites de Júpiter.

ABSTRACT

In this second article we continue the historical journey started in part 1, the moment we are highlighting is the period of discovery itself, and we will not continue with the post-discovery period, which is characterized by the refinement of the value of the speed of light, which is today one of the most important constants of nature used in science. We saw that it was the Danish astronomer's calculations that led him to an estimate of the delay time for eclipses on Jupiter's satellite Io. Despite having this data in hand, it was Huygens who actually calculated the speed of light for the first time in history. We will also see how this discovery had an impact. We know that even though the finiteness of the speed of light is a statement based on facts, not all European scholars quickly accepted this result easily.

Keywords: calculation of the speed of light; roemer data; Huygens; Io satellite; ephemerides of Jupiter's satellites.

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

1. Discussões sobre os dados astronômicos de Roemer

Com a divulgação da sua teoria, os outros estudiosos esperavam que Roemer apresentasse em maiores detalhes a sua descoberta e o caminho pelo qual ele seguiu para chegar a ela, o que ele não veio a fazer, ele continuou a divulgar nos meios acadêmicos, artigos complementando o que ele já havia apresentado no seu primeiro artigo de dezembro de 1676, nesse sentido, ele publicou em 1677, nas *Philosophical Transactions of the Royal Society*, o artigo intitulado *Demonstration concerning to the motion of light*, e no ano seguinte Roemer apresentou à Academia francesa um novo trabalho intitulado *Confirmatio douctrinae de mora Luminis ex Novis observationibus anni*, onde como o próprio título nos diz, ele confirma a sua teoria com base em novas observações realizadas por ele no ano de 1677, porém, conforme nos diz [6], Roemer não chegou a publicar um trabalho contendo os dados que levaram as suas conclusões.

Então o que podemos fazer é apenas especular como o físico dinamarquês chegou as suas conclusões, em 1913. Kirstine Bjerrum Meyer (1861-1941), doutora em ciências naturais e Ph.D em Física pela Universidade de Copenhagen, encontrou na National Library em Copenhagen uma cópia de um manuscrito original de Roemer, e neste, continha alguns dados relativos à observações do astrônomo do século XVII. Meyer e outros pesquisadores do século passado usaram os dados contidos nesse manuscrito para interpretar as conclusões de Roemer, além do trabalho de Meyer, temos também aquelas discussões feitas pelo trabalho de Jerome Bernard Cohen (1914-2003) sobre o trabalho de Meyer sobre essa questão.

Tabela 1. Os dados são referentes aos dados do manuscrito, a eles foram acrescentados o período médio Io [6].

Intervalo	Início do Período - Fim do Período	Número de Revoluções de Io no Período	Período médio de Io Calculado	Imersão(I)/ Emersão(E)
I	19/03/1671 - 04/05/1671	26	1d.18h.28m.44s.	E
II	24/10/1671- 20/02/1672	71	1d.18h.28m.17s.	I
III	07/03/1672 - 29/04/1672	30	1d.18h.28m.37s.	E
IV	27/11/1672 - 24/03/1673	66	1d.18h.28m.12s.	I
V	18/04/1673 - 04/08/1673	61	1d.18h.28m.47s.	E
VI	20/07/1675 - 29/10/1675	57	1d.18h.28m.50s.	E
VII	12/05/1676 - 13/06/1676	18	1d.18h.28m.21s.	I
VIII	07/08/1676 - 09/11/1676	53	1d.18h.28m.47s.	E
IX	09/06/1677 - 25/07/1677	26	1d.18h.28m.29s.	I

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

Nas figuras 2 e 3, encontramos o referido manuscrito de Roemer, o qual consta as observações feitas pelo astrônomo referentes aos eclipses do primeiro satélite de Júpiter, e a tabela 1, algumas informações referentes ao satélite de Júpiter (Io), essa tabela é uma adaptação do conteúdo do manuscrito feito por Kristensen e Pedersen [13], e por [6].

Com base nos dados da figura 2, sabemos que Roemer dividiu os seus dados em 9 períodos e também separou as observações de imersões e emersões. De acordo com [6], as imersões foram observadas quando o movimento da Terra em sua órbita é tal que estava se aproximando de Júpiter. Para as emersões foram observadas quando a Terra estava se afastando de Júpiter. Para os cálculos realizados por Roemer, foram usados os dados coletados nos anos de 1671 à 1673 [6], esses dados se encontram nos intervalos de I à IV da tabela 1. Tendo em vista que nesse período de 1671 à 1673 o movimento de Júpiter foi mais lento, devendo ao fato dele ter passado pelo afélio de sua órbita em 1672, então Roemer sabia que a variação do movimento era menor do que em outros períodos de sua observação, com essa consideração o período médio de Io pode ser calculado pela razão entre o intervalo de tempo (ΔT) de variação do movimento e o número (n) de revoluções observadas nesse intervalo, assim,

$$T_{\text{médio}} = \frac{\Delta T}{n}$$

Onde $T_{\text{médio}}$ é o período médio do satélite Io no período (ΔT) de tempo considerado. Para calcular o período médio de Io, vamos usar os dados da tabela 1, baseados nesse período mencionado, no caso, ao invés do ano de 1673, vamos usar o ano de 1672, e de acordo com [12], devemos considerar a primeira e a última medida dentro deste período, de forma que o intervalo coincida aproximadamente com o intervalo entre duas oposições sucessivas entre a Terra e Júpiter, a qual, corresponde a aproximadamente 399 dias [6], por meio dessas considerações, temos que,

$$t_1 = 19/03/1671 \equiv 09h.01m.44s + 7m.52s$$

$$t_1 = 19/03/1671 \equiv 09h.09m.36s. (2331457,88166 JD)$$

$$t_2 = 22/04/1672 \equiv 8h.34m.28s. - 1m.58s$$

$$t_2 = 29/04/1672 \equiv 8h.32m.30s. (2331857,8559 JD)$$

De acordo com [6], o satélite Io executa um número $n = 226$ revoluções nesse intervalo de 1671 à 1672, logo temos que o período médio do satélite é,

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

$$\Delta T = t_2 - t_1 = 2331457,88166 - 2331857,8559 \approx 399,974$$

$$T_{\text{médio}} = \frac{\Delta T}{n} = \frac{399,974}{226} = 1,7697964 \sim 1\text{d.}18\text{h.}28\text{m.}30\text{s.}$$

Agora considerando as imersões correspondente ao período de 1671 e 1672, observando o intervalo II da figura 2, e tomando o eclipse de 12 de janeiro como o último desse período de imersões, o tempo solar aparente t_A do primeiro eclipse é,

Figura 2. Recorte do manuscrito de Roemer achado em 1913, com dados astronômicos sobre os eclipses de Io no período de 1668 à 1678 [5].

*offer primo Journalium
parifit.*

1668. <i>Excl. A. debet</i>	1673. 11
Oct. 22 - 10 41 33 Imersão	Apr. 18 - 9 22 0 Emerção
1669	Apr. 25 - 11 18 5 Emerção
Nov. 20 - 16 26 40 Imersão	Mai. 2 - 13 12 40 Emerção
1671	Mai. 11 - 9 17 39 Emerção
Mar. 19 - 11 14 4 Emerção	Mai. 18 - 11 32 44 Emerção
Apr. 27 - 9 42 30 Imersão	Aug. 4 - 8 30 41 Emerção
Mai. 4 - 9 42 30 Emerção	Decem. 17 - 6 39 14 Imersão
Oct. 18 - 13 15 0 Imersão	1674. 11
Dec. 18 - 16 26 40 Imersão	Jul. 31 - 9 19 2 Emerção
1672	1675. 11
Jan. 3 - 12 42 36 Imersão	Jul. 20 - 8 22 42 Emerção
Jan. 10 - 14 32 14 Imersão	Jul. 27 - 10 17 31 Emerção
Jan. 12 - 8 59 22 Imersão	Oct. 29 - 6 7 22 Emerção
Feb. 11 - 10 57 6 Imersão	1676. 11
Feb. 20 - 7 20 26 Imersão	Mai. 12 - 14 14 42 Imersão
Mar. 7 - 7 58 25 Emerção	Jun. 13 - 10 56 11 Imersão
Mar. 14 - 9 52 30 Emerção	Jun. 14 - 9 49 50 Emerção
Mar. 23 - 6 18 14 Emerção	Aug. 14 - 11 45 55 Emerção
Mar. 28 - 13 45 30 Emerção	Aug. 23 - 8 11 13 Emerção
Mar. 30 - 8 14 46 Emerção	Nov. 9 - 16 45 35 Imersão
Apr. 6 - 10 11 22 Emerção	1677. 11
Apr. 13 - 12 8 8 Emerção	Jun. 9 - 12 23 24 Imersão
Apr. 22 - 8 34 28 Emerção	Jun. 16 - 14 16 14 Imersão
Apr. 29 - 10 30 6 Emerção	Jul. 9 - 14 21 54 Imersão
Nov. 28 - 5 37 5 Imersão	Jul. 19 - 10 47 0 Emerção
1673	Jul. 25 - 12 37 10 Imersão
Feb. 4 - 17 31 10 Imersão	Aug. 26 - 11 31 50 Emerção
Feb. 6 - 12 0 0 Imersão	Apr. 11 - 9 54 30 Emerção
Feb. 13 - 13 53 20 Imersão	Apr. 18 - 8 41 0 Cont. de Io
Feb. 27 - 17 40 10 Imersão	8 46 0. Solus R. de Io
Mar. 1 - 12 9 1 Imersão	11 51 46 Emerção
Mar. 15 - 16 0 48 Imersão	Sept. 19 - 8 14 0 Cont. de Io
Mar. 17 - 10 24 16 Imersão	8 18 30 Solus R. de Io
Mar. 24 - 12 24 30 Imersão	Nov. 5 - 6 59 0 Emerção
	1678
	Jan. 6 - 5 25 47 Emerção

$$t_3 = 24/10/1671 \equiv 18\text{h.}15\text{m.}00\text{s} - 15\text{m.}41\text{s.}$$

$$= 24/10/1671 \equiv 17\text{h.}59\text{m.}19\text{s.} (2331677,24953 \text{ JD})$$

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

E a outra imersão fica,

$$\begin{aligned}t_4 &= 12011672 \equiv 8h.59m.22s. + 9m.23s \\ &= 12011672 \equiv 9h.08m.45s \quad (2331756,88108 JD)\end{aligned}$$

A diferença de tempo é dada então por,

$$\Delta T_1 = t_4 - t_3 = 2331756,88108 - 2331677,24953 = 79d.15h.10m.5s \sim 79,632d.$$

Tendo essa informação podemos usar o período médio calculado anteriormente para estimar o número de revoluções que o satélite executou nesse período situado entre os eclipses em t_3 e t_4 , e dessa forma, façamos o seguinte,

$$T_{\text{médio}} = \frac{\Delta T_1}{n} \Rightarrow n = \frac{\Delta T_1}{t_{\text{médio}}} \Rightarrow n = \frac{79,632}{1,769} \approx 45,01 \sim 45$$

Tendo que o número de revoluções é $n = 45$, podemos igualmente estimar,

$$\Delta T_2 = n \cdot T_{\text{médio}} = 45 \cdot (1d.18h.28m.30s.) = 79d.15h.22m.30s.$$

Observa-se que há uma diferença entre os valores ΔT_1 e ΔT_2 , de fato, o valor de ΔT_2 é maior do que o valor de ΔT_1 [6], e podemos calcular que,

$$\begin{aligned}\Delta T_3 &= \Delta T_2 - \Delta T_1 = 79d.15h.22m.30s. - 79d.15h.10m.5s \\ &= 12m.25s\end{aligned}$$

É com esse intervalo de 12 minutos de diferença que Roemer usou como uma prova de que o atraso no tempo era devido à velocidade finita da luz, pois no cálculo de ΔT_2 da forma como foi feito, se supunha que a velocidade da luz seria infinita, dado não se levava em conta que luz demandaria de tempo para percorrer a distância Terra-Júpiter, todavia, a diferença entre a estimativa média e o tempo observado diretamente pelos dados foi determinante para que o estudioso concluísse que a sua hipótese seria verdadeira, segundo [6], essa distância (Terra-Júpiter) diminui no intervalo considerado, pois as medidas referem-se a imersões de Io no disco de Júpiter, que são realizadas enquanto a Terra se aproxima de Júpiter.

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

2. Huygens e a descoberta da velocidade finita da luz por Roemer

Assim, Olé Roemer foi para Paris e lá conquistou maior reconhecimento perante o mundo acadêmico. Christiaan Huygens (1629-1695) também foi a Paris a convite de ninguém menos do que o próprio Rei Louis XIV, Huygens permaneceu em Paris de 1666 à 1681, onde fez grandes descobertas. Ele também foi um dos primeiros estrangeiros (junto a Cassini) a ser nomeado membro da *Academia Real de Ciências de Paris*, também recebia uma pensão como membro honorário da Academia, contudo, as medidas antiprotestantes de Louis XIV, levou a grande perseguição dos protestantes franceses (huguenotes). Huygens, como um cristão protestante, acabou voltando para a Holanda na década de 1680. Como Huygens residiu em Paris durante toda a década de 1670, e sendo ele membro da Academia e do observatório de Paris, seria improvável que ele não tivesse ficado sabendo dos trabalhos do astrônomo dinamarquês sobre a velocidade da luz. Huygens, assim como Cassini e Roemer também era um astrônomo de primeira linha, a descoberta de Roemer teve algum impacto na obra de Huygens e no desenvolvimento de sua teoria ondulatória da luz [2].

Sabemos que Huygens esteve durante a década de 1670 preparando a sua teoria ondulatória da luz, e escreveu o manuscrito *Traité de la lumière* (Tratado sobre a luz) em 1678, o qual, permaneceu sob a forma manuscrita até ser publicado em 1690 na Holanda. Nesse tratado o físico holandês expõe ao mundo a sua teoria ondulatória da luz, na qual ele consegue deduzir muitos dos fenômenos luminosos baseando-se no princípio de que a luz se propaga como onda. Huygens, que apresentou um resumo desse seu trabalho em 1678, perante os membros da Academia Francesa de Ciências, este livro era o lugar perfeito para Huygens declarar apoio ou não à descoberta de seu contemporâneo, pois, nessa época, ele já sabia do trabalho de Roemer. Em 16 de setembro de 1677, Huygens escreveu a Roemer informando-lhe que tinha lido recentemente o seu artigo de 1676, expressando a sua admiração e felicitando-o pela sua descoberta [2]. Apesar de Roemer ter feito os cálculos e saber que a luz demora 11 minutos para cruzar o raio da órbita terrestre [6], e nessa época, os astrônomos já terem a sua disposição o valor da distância Terra-Sol, Roemer não chegou a concluir os seus cálculos para apresentar a sua estimativa para a velocidade da luz, não se sabe exatamente o porquê disso.

Huygens, que foi um dos primeiros estudiosos importantes dessa época a acreditar na possível validade da descoberta de Roemer, usou os dados astronômicos do seu colega para estimar que a velocidade da luz era de 600 mil vezes maior do que a velocidade do som [2].

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

Nessa época a velocidade do som aceita pelos filósofos (entre eles Huygens) era um valor próximo à 351 m/s , logo obtém-se para a velocidade da luz uma estimativa equivalente a 210000000 m/s ou ainda $2,1 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ o que sabemos ser uma estimativa inferior ao valor que usamos hoje ($\sim 2,99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). O erro na estimativa está relacionado a imprecisão dos aparelhos usados por Roemer, nessa época, os telescópios não eram tão precisos e certamente que foram feitas aproximações.

Apesar de Huygens ter aceito o princípio da finitude da velocidade da luz, ele não se precipitou a divulgar a sua aceitação dessa hipótese, na sua monografia apresentada em 1678 na Academia, ele afirma que ‘das observações terrestres e celestes, somente podemos concluir que a propagação da luz é extremamente rápida’ [2], mas no primeiro capítulo do seu tratado sobre a luz de 1679, Huygens explica detalhadamente as ideias de Roemer e as utiliza para calcular a velocidade da luz [6], ou seja, essa foi a primeira vez que a estimativa da velocidade finita da luz foi publicada.

Se considerarmos a vasta extensão do diâmetro KL [diâmetro da órbita terrestre], que segundo meus cálculos é de uns 24 mil diâmetros da Terra, conheceremos a extrema velocidade da luz. Suponhamos que LK fosse apenas 22 mil desses diâmetros. Sendo percorridos em 22 minutos, isso corresponde a mil diâmetros por minuto, e $16\frac{2}{3}$ diâmetros em um diâmetro em um segundo ou batimento arterial que são mais de mil e cem vezes cem mil toesas; pois o diâmetro da Terra contém 2865 léguas [...] e cada légua é de 2282 toesas [...]. Mas o som, como disse antes, não percorre senão 180 toesas no mesmo tempo de um segundo. Portanto, a velocidade da luz é mais de seiscentas mil vezes maior que a do som - o que, no entanto, é completamente diferente de ser instantânea [6].

Nesse primeiro momento apenas Huygens e Picard aceitaram as ideias de Roemer. A grande maioria dos filósofos e astrônomos não se mostraram totalmente convencidos pela hipótese de finitude da velocidade da luz, como já foi dito, a opinião cartesiana era bastante influente. Com relação a Cassini, as suas objeções eram legítimas, ele que argumentava que a irregularidade no período de Io não era observada nos outros satélites de Júpiter, sugerindo que as irregularidades poderiam estar relacionadas com a ainda desconhecida excentricidade da órbita dos satélites [6], que até então era desconhecida pelos astrônomos. Cassini não rejeitou completamente a hipótese levantada por Roemer, para ele, essa seria uma das hipóteses possíveis para explicar o fenômeno, mas não era a única, Cassini se opunha a Roemer basicamente, por ele ter atribuído a sua hipótese da velocidade finita da luz como uma conclusão definitiva para o problema. Uma curiosidade sobre essa história, foi que na publicação do

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

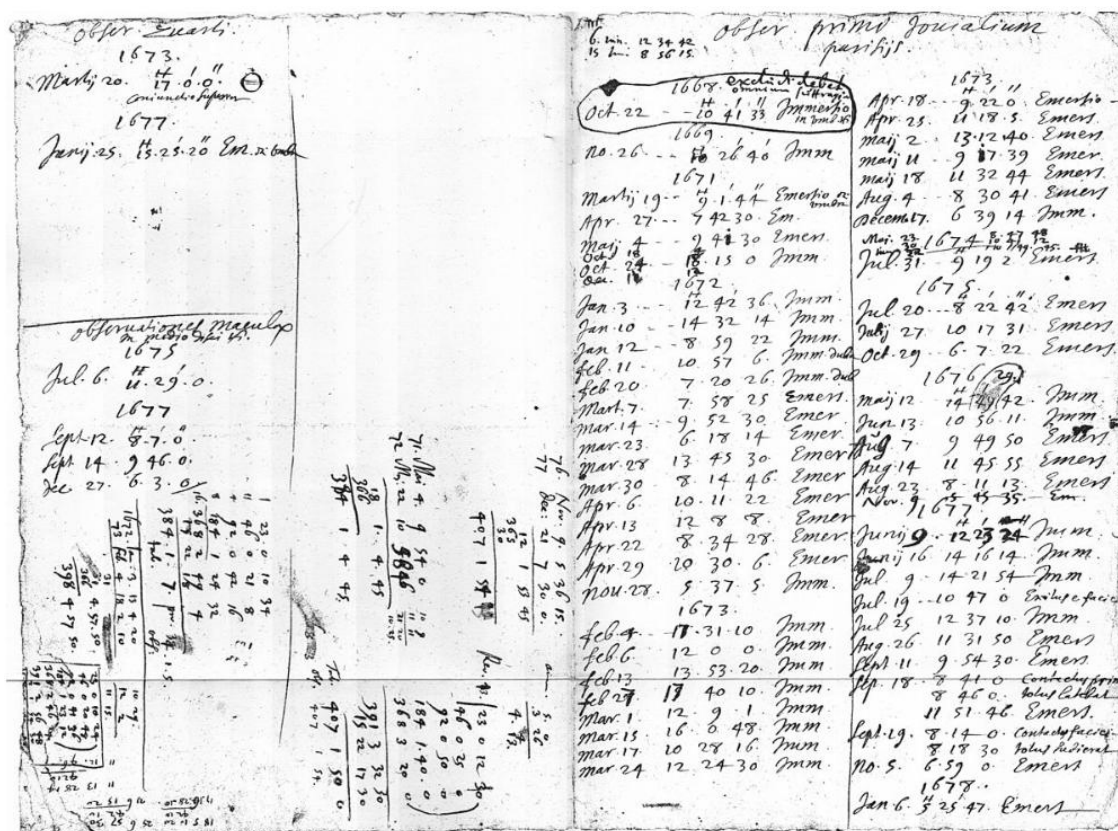
primeiro artigo de Roemer pelos meios de comunicação da *Academia de Paris*, tanto Picard como o próprio Cassini, concordaram com a sua publicação, deixando que o autor se responsabilizasse por suas ideias [6].

A consideração de Huygens sobre o modelo ondulatório o permitiu concluir que a luz se propaga mais lentamente em meios mais densos, essa é uma propriedade importante, as partículas etéreas do meio mais denso por ser em maior quantidade, a luz acaba sendo obrigada a desviar de maior número de obstáculos o que altera em média a sua velocidade de propagação [6]. O uso de ondas por Huygens para criar um modelo para explicar a luz, também teve uma certa influência na sua analogia com o som que, nessa época, os filósofos já sabiam se tratar de um tipo de onda, assim como a luz, o som se propaga em todas as direções com uma velocidade muito rápida (não tanto quanto a da luz). Com base nesse entendimento, Huygens cria o seu modelo ondulatório para a luz, não obstante, apesar de Huygens deixa claro que tal tratamento para a luz deve levar em conta que a luz e o som não são fenômenos recíprocos, ou seja, embora o tratamento da luz seja feito em analogia ao som, os seus meios de propagação possuem naturezas distintas [6].

Entretanto, a descoberta de Huygens pode ter tido alguma relação mais próxima com o som, pois nessa época, os filósofos naturais já vinham realizando experiências com o som, e já se tinha indícios de que o mesmo sofria alterações na sua velocidade de propagação ao mudar de meio. Assim, Huygens coloca em evidência a sua ideia de que a luz se propaga com velocidade relativa ao seu meio de propagação, mas não surgiu com Huygens a ideia de um meio de referência como fazemos hoje, assumindo o vácuo essa posição. Em relação ao mecanismo de propagação da luz Huygens apresenta a sua hipótese de que a propagação da luz ocorre por meio da colisão de partículas que constituem o meio etéreo [6], é devido a diferença da constituição material de cada meio que a luz tem velocidade diferente.

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

Figura 3. Manuscrito original de Roemer encontrado na Biblioteca de Copenhague em 1913 por Meyer [12].



3. A aceitação da velocidade finita da luz

Na Europa pelo fim do século XVII, havia astrônomos que intuía a importância da descoberta de Roemer, afinal se essa quantidade fosse finita, isso teria implicações relevantes na forma como os astrônomos faziam as suas observações, pois sabemos que em certos cálculos astronômicos um atraso de poucos minutos no tempo teria repercussões significativas. De fato, as ideias de Roemer foram se espalhando aos poucos nos primeiros anos, inicialmente apenas um círculo restrito de estudiosos da *Academia de Paris* ficou sabendo da novidade da descoberta de Roemer. No ano de 1677, como já vimos Roemer publicou na *Philosophical Transactions* um artigo sobre a sua descoberta o que permitiu que muitos filósofos membros dessa instituição ficassem sabendo da novidade. Na Inglaterra, quem fez maior esforço inicialmente para divulgar as ideias de Roemer foi o astrônomo inglês John Flamsteed (1646-1719) que também já vinha estudando o problema das efemérides dos satélites de Júpiter.

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

Flamsteed que era o astrônomo real e, além disso, diretor do observatório de Greenwich, sofria com a falta de recursos e de pessoal, enquanto o observatório de Paris, contava com astrônomos de grande proeminência. O seu contraparte inglês contava com o esforço de Flamsteed que também era um grande astrônomo, mas estava sozinho na tarefa de pesquisa e além das suas obrigações com a supervisão das observações e elaboração dos dados astronômicos, limitou-se a fazer um catálogo das estrelas [2], um trabalho que lhe custou vários anos de sua vida e que no final ele ainda achava que estava demasiado incompleto para ser publicado. Flamsteed também teve algumas discordâncias com Newton, pois quando este último lhe solicitou os seus dados sobre suas observações da Lua, dados esses que seriam importantes para Newton completar a sua teoria lunar, algo que havia ficado incompleto nos *Principia*, Flamsteed não se dispôs a se prestar inteiramente as exigências de Newton e ambos acabaram tendo desavenças.

Flamsteed logo quando ficou sabendo da descoberta de Roemer feita em Paris, talvez possa ter ficado chateado por uma descoberta de tal importância não ter sido feita em seu observatório. Mas quando ficou sabendo sobre o artigo de Roemer publicado na revista da *Royal Society*, aceitou a proposta de Roemer, e achava a descoberta digna de maior divulgação entre os seus contemporâneos, e ele fez muito no sentido de divulgar as ideias do físico dinamarquês nas suas conferências pela Inglaterra. Foi Flamsteed quem informou a Newton sobre a novidade, a qual aparentemente ele ainda não sabia, e deu a ele a sua posição favorável a questão. Huygens em uma visita que fez a Londres em 1689, também foi convidado a ir ao observatório de Greenwich, onde encontrou Flamsteed, e ambos discutiram sobre as ideias de Roemer; Huygens, nesse encontro deu detalhes sobre o seu próprio trabalho, e como a sua teoria concordava com essa previsão de Roemer.

O próprio Roemer também visitou a Inglaterra em 1679, lá ele assistiu a conferências na *Royal Society*, às quais, ele teve a oportunidade de se encontrar com Hooke, Halley e Flamsteed [2], nesses encontros Roemer pessoalmente divulgou as suas descobertas. Hooke, conhecido por ser um crítico ferrenho do trabalho de outros pesquisadores, também não aceitou as propostas de Roemer, em seu próprio trabalho sobre óptica, já havia afirmado que a luz se propaga instantaneamente, e de tal modo que não estava a fim de se retratar publicamente sobre a questão. Ele argumentou de maneira bastante semelhante a Cassini, justificando que a hipótese da velocidade finita não seria a única razão que poderia estar por trás do atraso na medida, ele também sugeriu que o sol e os outros planetas podiam exercer alguma influência

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

sobre o movimento do satélite, algo que Roemer não havia considerado. Em 1680, novamente Hooke se mostrou contrário às ideias de Roemer, na *Royal Society* na divulgação do seu novo livro de óptica, o *Lectures of Light*, ele diz,

[a experiência de Roemer mostra que] A propagação da luz não é instantânea, mas temporal e demora algum tempo a passagem da luz, de um objeto luminoso para o olho ..., mas se examinarmos a experiência com maior cuidado ..., não existem bases suficientes para retirar esta conclusão ..., mas supondo que se prove que é temporária e não instantânea, consideremos isso extremamente veloz que está para além da imaginação ..., que se move num espaço igual ao diâmetro da Terra ..., em menos de um segundo ..., e, por isso, porque não pode ser considerada instantânea eu não vejo razão [2].

Outro astrônomo inglês que se tornaria mais reconhecido após a descoberta da órbita do cometa que leva o seu nome e também do seu contato com Newton, foi Edmond Halley (1656-1742) que era um amigo próximo de Cassini, os quais frequentemente trocavam correspondência sobre assuntos científicos, claramente que dentre esses assuntos estavam os eclipses dos satélites de Júpiter, só que ao contrário de Hooke, Halley tentou verificar a hipótese de Roemer por meio de outras observações independentes. Halley estudou minuciosamente os dados dos eclipses de Júpiter e realizou ele próprio algumas observações o que culminou na sua publicação em 1694 de uma adaptação das tabelas de Cassini para as efemérides dos satélites de Júpiter, com base nessas observações Halley foi capaz de comprovar a validade da hipótese de Roemer, algo que de início ele não era muito a favor dada a sua proximidade com Cassini. Com essa sua constatação Halley, apesar do respeito que tinha por Cassini, passou a critica-lo por sua relutância negar aquilo que os dados mostravam, Halley também veio a chegar a um valor mais exato para o tempo que a luz demora para percorrer o raio da órbita terrestre, que deve ser um valor próximo a 8,5 minutos.

Em relação a Newton, certamente que a natureza (finita ou infinita) da quantidade referente a propagação da luz seria do seu interesse, dado que o seu envolvimento com a Óptica era grande. Não é conhecido o posicionamento de Newton sobre o problema da velocidade da luz antes dele saber sobre a descoberta de Roemer. Não foi antes de 1684 [2], que Newton veio a saber sobre as ideias de Roemer – no *Principia*, o livro mais famoso de Newton, publicado em 1687, o filósofo menciona finitude da propagação da luz, e diz que a afirmação se comprova pelo recurso aos satélites de Júpiter, mas não fala diretamente no nome de Roemer.

Mas em 1704, Newton com a publicação do seu livro *Optics*, ele fala mais detalhadamente sobre a descoberta, e dessa vez, atribui diretamente a Roemer o feito, e busca

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

incorporar o princípio da finitude em sua teoria. É basicamente pelas mãos de Newton, que as ideias de Roemer se tornaram amplamente conhecidas, pois o sucesso que o livro *Optics* teve logo após sua publicação, tendo um grande número de leitores no século XVIII, ajudou não apenas a tornar a propagação finita da luz uma ideia conhecida, como também muitos vieram a acreditar na veracidade daquela afirmação, muito devido a autoridade que Newton já havia alcançado naquela época, como filósofo, físico, matemático e estudioso, em geral. Nesse livro, Newton oferece a estimativa de que a velocidade da luz é 700000 vezes maior do que a velocidade do som [2].

4. Considerações Finais

Como vimos a velocidade da luz tem uma longa história ao longo do desenvolvimento da ciência, de fato, é uma questão científica que causou grande divisão, sempre foi constatado que a luz se espalha pelo espaço de forma muito rápida, uma rapidez que foge aos nossos sentidos, por milênios, se acreditou que talvez a propagação da luz se dava de forma instantânea, sem precisar de tempo para a luz preencher todos os pontos do espaço. Embora, isso não fosse um fato consumado, muito provavelmente era uma noção ou uma intuição dos povos curiosos de antigas civilizações já perdidas no tempo. Porém, é entre os gregos que ocorre um refinamento profundo do questionamento sobre a propagação da luz, é efetivamente com eles que surge **o problema da velocidade da luz**, isto é, a luz se propaga no tempo ou não demanda de tempo para se movimentar? Em outras palavras, a questão era a de determinar se a velocidade de propagação era finita ou infinita.

Entre os gregos a indecisão se mostrou aparente, alguns sustentavam a tese da infinidade, outros sustentavam a tese contrária, os argumentos usados por cada lado para defender os seus pontos de vista eram na maioria das vezes pouco sólidos, mas baseados em opiniões do que em fatos empíricos concretos. Mas tendo os gregos emancipado o campo da óptica como um ramo do conhecimento da filosofia natural, a partir da tradição grega, todos aqueles que estudaram a óptica em maior profundidade na antiguidade, na Idade Média e no período moderno teve, em algum grau, o questionamento sobre a velocidade da luz.

Como vimos foi na modernidade, durante o tempo prodigioso da Revolução Científica europeia dos séculos XVI-XVII, que os fundadores da nova ciência começaram a abordar o problema por meio dos novos recursos técnicos-experimentais resultantes da nova ciência que

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

estava emergindo, Galileu apareceu com um método teórico-experimental bastante engenhoso, porém, este era inconclusivo.

O que dificultava bastante o método de Galileu era a pouca distância de qual ele fazia uso, e também a falta de aparatos precisos para a medida do tempo, na época em que Galileu viveu não existiam ainda relógios ou tecnologias precisas para a medida do tempo – claro que Galileu foi o precursor na tentativa de construir relógios precisos. Então, mesmo que fosse tomada uma distância maior entre os observadores, o experimento ainda não seria bem sucedido. Descartes apontou para a inutilidade do experimento de Galileu, não que não fosse uma grande ideia, mas, de fato, não tinha propensão prática.

Foi efetivamente Descartes que abriu o caminho assertivo para superar a questão ao idealizar que era pelos métodos astronômicos que os filósofos poderiam desvendar a questão, o experimento que ele próprio formulou não deu os resultados desejados, todavia, o caminho já estava aberto para outros explorarem. Em 1676, talvez incidentalmente, que Olé Rømer, um astrônomo dinamarquês, observou atrasos nos eclipses das luas de Júpiter, ele propôs que esses atrasos eram causados pelo tempo que a luz leva para viajar da Terra à Júpiter.

Realizando a primeira medição indireta da velocidade da luz, na verdade, não foi por acaso que Roemer formulou a suas ideias, ele e outros astrônomos de seu tempo já vinham estudando um fenômeno curioso sobre os eclipses dos satélites de Júpiter, que ajudaria a resolver muitos problemas práticos, os astrônomos que tentando determinar as efeméridesⁱ dos satélites de Júpiter, com base na observação da imersãoⁱⁱ e emersãoⁱⁱⁱ do primeiro satélite do planeta Júpiter (Io), essas descobertas dariam grande crédito a quem as fizesse, pois teria muitas aplicações.

Roemer descobriu o atraso com relação as previsões teóricas, previsões essas que não levavam em conta a velocidade finita da luz, é certo que as previsões da teoria de Cassini foram feitas tendo como base a ideia de que a luz se propagava instantaneamente. Apesar da relutância de alguns em aceitar as ideias de Roemer, estudiosos de grande peso e envergadura, como Christiaan Huygens, não só aceitou a hipótese de Roemer como a incorporou aos seus próprios modelos teóricos.

Huygens foi factualmente o primeiro homem da história a determinar um valor “exato” para a luz. Apesar de Roemer já ter todas as condições para também o fazer, ele não fez, mas isso em nada tira o seu mérito como o verdadeiro descobridor da velocidade finita da luz, um fato que Newton reconheceu decisivamente em favor de Roemer e que tornou o seu saber, que

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

antes era restrito a poucos, e após a divulgação do *Optics*, em 1704, passou a ser do conhecimento geral dos inúmeros leitores deste memorável livro de Newton. Ademais, a determinação da velocidade finita da luz, ajudaria não apenas nos interesses práticos da ciência, tendo igual valor para os fins teóricos, certas medidas e quantidades na física (não apenas na óptica) são indefinidas sem o conhecimento dessa quantidade, claro que a história da velocidade da luz não termina com o trabalho de Roemer e Huygens no século XVII, muitos outros estiveram empenhados na determinação precisa dessa quantidade nos séculos seguintes.

Figura 4. Retrato de Olé Roemer trabalhando em seu observatório [5, p. 328-329]

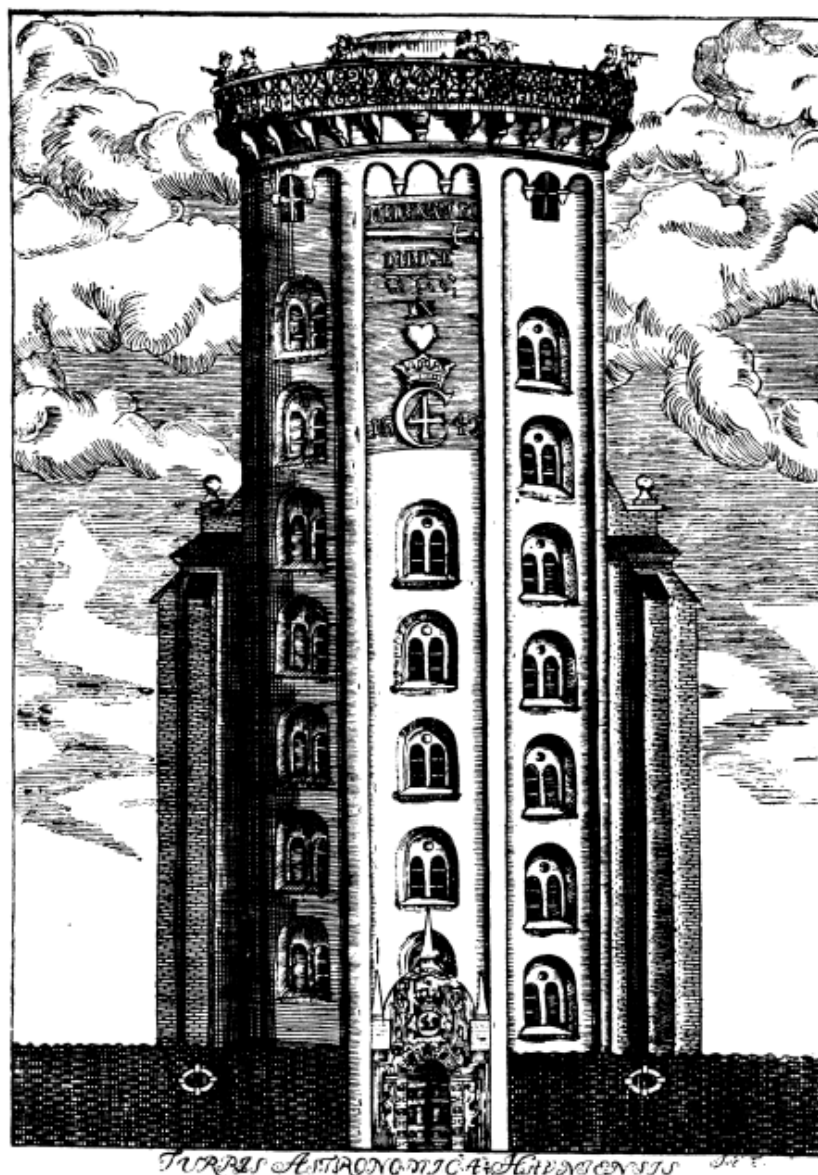


A próxima imagem se trata do *Observatório Real de Copenhague*, uma instituição para a qual Roemer trabalhou após a sua saída de Paris e o seu retorno à Dinamarca. Segundo [5] “o Astrônomo Real, Roemer era automaticamente o diretor do Observatório de Copenhague, um

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

dos mais antigos da Europa. O observatório ficava na “Torre redonda” (Round Tower) que havia sido construída por Christian IV em 1637 para o assistente de Tycho, Longomotanus [se trata do astrônomo dinamarquês Christen Sørensen Longomontanus (1562-1647) que trabalhou muito tempo nesse local.]. Roemer [de início] fez algumas observações nesta “torre redonda”, mas achou que era insatisfatória, já que os instrumentos tinham de ser colocados no telhado desprotegido e, portanto, estavam sujeitos a fortes perturbações do vento. Além disso, a constante exposição do observador desprotegido certamente seria prejudicial à sua saúde. Roemer fez planos para um observatório mais adequado e enquanto esperava pelos detalhes da aprovação e construção, converteu a sua casa em um observatório” [5, p. 362-364].

Figura 5. A “torre redonda” no observatório de Copenhague [5, p. 363].



As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

5. Adendo Histórico

Agora, temos por intenção fazer um acréscimo de certos fatos históricos sobre a história da velocidade da Luz, sendo uma revisão geral do conteúdo histórico. Vimos nesses dois artigos, um recorte de boa parte do período histórico que compõe a história do assunto que estamos investigando. Foi na Grécia que o interesse científico pela velocidade da luz se tornou evidente, a curiosidade dos filósofos gregos trouxe a questão a especulação. Sabemos de acordo com [5] que entre os gregos, parece ter havido uma crença geral de que a velocidade da luz era finita. Porém, também é importante notar que a velocidade da luz não um dos problemas considerados, dentre os mais importantes pela filosofia grega. Segundo [5], havia muito mais interesse dos gregos pela catóptrica e problemas da visão. Foram, poucos os filósofos gregos que trataram efetivamente do tema da velocidade da luz, e os que o faziam não preocupavam muito em provar aquilo que afirmavam, Aristóteles, por exemplo, parece ter sido a favor da posição da infinitude da luz, e não há uma discussão em sua obra para justificar a sua posição, e geralmente Aristóteles era propenso a tecer comentários para as suas especulações.

Um filósofo [dos poucos que o fez] que deixou uma opinião sobre o assunto “Empédocles de Agrigeto (490-430 a.C.) poeta, filósofo, cientista e reformador social estava errado ao falar da luz como 'viajando' ou estando em um dado momento entre a Terra e o envoltório, já que seu movimento é inobservável para nós” [5, p. 328], ele era da opinião de que a luz se movia a uma velocidade finita, apesar de não estar certo sobre isso, “discutiu, ainda, a questão da luz (admitindo levar tempo para a luz viajar pelo espaço) e da visão” [3, p. 126], ou seja, Empédocles era da opinião de que a velocidade da luz era finita.

Heron de Alexandria (10-80 d.C.) teria sido um dos primeiros cientistas gregos a discutir usando um tipo de experimento mental a questão, a esse respeito [5] nos diz “uma 'prova' interessante de que a velocidade da luz deve ser finita é dada por Heron de Alexandria, famoso por suas máquinas a vapor, bem como por sua explicação teleológica da reflexão por meio do caminho mínimo'. De acordo com Heron, você virá sua cabeça para o céu à noite, mantendo os olhos fechados; então de repente os abre, momento em que você vê as estrelas. Como nenhum tempo sensível decorre entre o instante de abrir os olhos e o instante de visão das estrelas, a luz viaja instantaneamente” [5, p. 328-329].

Aristóteles e outros contemporâneos seus não deixaram a sua opinião completamente esclarecida, e a tradição grega efetivamente não teve contribuições mais significativas que foram além dessa de Heron. Após o fim da tradição científica grega, o que vamos ver é o trabalho dos seus sucessores, os primeiros deles são os árabes que mesmo sob os auspícios negativos da Idade Média, os filósofos islâmicos foram os que mais fizeram para continuar as especulações dos gregos na óptica. Segundo [5], foi Abu Ibn Sīnā (980-1073) mais conhecido no ocidente por seu nome latinizado Avicena, um dos cientistas islâmicos que mais se destacou no estudo da óptica, “Avicena fez um estudo de muitas questões físicas e observou que se a percepção da luz é devido à emissão de algum tipo de partículas pela fonte luminosa (como ele acreditava), então a velocidade da luz deve ser finita” [5, p. 329], um raciocínio bastante apurado.

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

Outro estudioso islâmico que veio a corroborar para a tese da finitude da luz de Avicena foi Abu Al-Hasan Ibn Al-Haitham (965-1039) mais conhecido por seu nome latinizado Alhazen ele foi talvez a maior autoridade em óptica em todo o mundo islâmico, e de fato sobre a propagação da luz ele fez alguns comentários em seu mais tratado sobre óptica “Em seu tratado sobre óptica (4) ele afirma que a luz é um movimento e, como tal, está em um instante em um lugar e em outro instante em outro lugar. Como ela não está em ambos os lugares ao mesmo tempo, deve haver um lapso de tempo entre os dois: portanto, a transmissão não pode ser instantânea [5, p. 329], um raciocínio bastante apurado.

Na Europa latina, que foi influenciada pelo trabalho dos filósofos islâmicos, temos Roger Bacon (1214-1292) que fez comentários extensos sobre a óptica de Alhazen, Bacon concordou com os argumentos do seu homólogo islâmico, de que a velocidade da luz é finita. Mas ele não acredita que essa hipótese possua uma base experimental concreta, ele como defensor do experimentalismo, não via que grande diferença entre o raciocínio usado por Alhazen e os seus opositores que argumentaram a favor da infinitude da luz,

Roger Bacon (1214-1292) embora em perfeito acordo com as conclusões de Alhazen sobre este assunto, sentiu que deveria mostrar, no entanto, que elas foram alcançadas sem nenhuma base adequada. Em seu *Opus Majus* (6), ele diz que “todas as autoridades fazem esta declaração [que a luz viaja instantaneamente] exceto Alhazen que tenta provar que esta visão é falsa... Mas essas razões de Alhazen não têm peso algum.” Essencialmente, Bacon mostra que o tipo de raciocínio usado por Alhazen é idêntico ao dos cientistas que tentam provar a visão oposta. No entanto, Bacon apenas substitui o argumento metafísico de Alhazen pelo seu próprio, igualmente metafísico (7), para concluir que a declaração de Aristóteles de que há uma diferença entre a transmissão de luz e a de outras impressões sensoriais... não deve ser entendida como consistindo no fato de que a luz é transmitida instantaneamente e as outras impressões requerem tempo... essa diferença não é de instantaneidade e tempo, mas de menos tempo e mais tempo. [5, p. 330]

Na era moderna o primeiro experimento que buscou determinar se a luz se propaga finita ou infinitamente foi feito, na verdade, não por Galileu, mas sim por Isaac Beeckman (1588-1637) um filósofo natural holandês que foi um dos primeiros entusiastas da experimentação, ele precedeu tanto Galileu como Descartes na tentativa de mostrar qual era a natureza da velocidade da luz. Beeckman elaborou um experimento em 1629, que usava pólvora e espelhos. Nesse experimento o físico propunha criar uma explosão e colocou espelhos a várias distâncias da explosão e com a ajuda de alguns colaboradores deixou-os como observadores, e queria saber se algum deles conseguia observar uma diferença no flash de luz refletido nos espelhos, talvez essa experiência possa ter chegado aos ouvidos de Galileu, que também foi influenciado a criar os seus próprios experimentos na tentativa de resolver o problema, dado que o experimento da explosão de Beeckman não gerou resultados conclusivos.

Então o debate sobre a questão da velocidade da luz precisar ou não de tempo para se mover se perpetuou pelo resto do período medieval, e finalmente seguiu para o escrutínio da nova ciência que viria a surgir após o renascimento, vindo a ter a solução definitiva com o

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

trabalho de Roemer. Apesar da demonstração de Roemer já ter sido suficiente para sustentar o argumento de que a velocidade da luz ter um valor finito, o valor que foi calculado por Huygens, tendo como base os dados do seu colega dinamarquês, a saber, 210000 km/s, esse valor não corresponde ao valor atual que assumimos para a luz. Certamente que depois dos trabalhos desses físicos no século XVII, houve ainda muito trabalho no sentido de tornar preciso o valor dessa constante universal.

Neste trabalho, não vamos alongar o nosso estudo para descrever os eventos posteriores a esses que descrevemos nesse trabalho. Todavia, cabe mencionar brevemente alguns eventos importantes, no século XVIII, as ideias de Roemer já tinham uma boa aceitação entre os filósofos naturais, principalmente após Newton o ter apoiado no muito influente livro *A treatise of Light* (ou *Opticks*). Quem veio a oferecer uma nova confirmação da finitude da luz foi o astrônomo inglês James Bradley (1693-1762) que sucedeu a Edmund Halley, em 1742, como o novo astrônomo real no observatório de Greenwich, ele foi instigado por uma hipótese de Robert Hooke [2], sobre a paralaxe de uma estrela fixa. Hooke observou uma pequena mudança na posição de uma estrela na constelação Dragão, e atribuiu a alteração da sua posição a paralaxe, Bradley buscou refazer as observações com cuidado, e verificar ou refutar a hipótese de Hooke.

Tendo ele efetuado as observações, ele constatou um desvio na posição da estrela, para explicar esse fenômeno, Bradley passou muito tempo pensando e buscando uma resposta apropriada para o desvio, “o efeito não devia ser devido à paralaxe, pois esta seria maior em março e setembro” [2, p. 36], enquanto que a observação de Bradley tinha ocorrido em dezembro de 1725. Depois de muita investigação, Bradley chegou a uma conclusão final em 1729, publicada numa carta escrita a Halley e que foi remetida a *Royal Society*, na qual ele diz “por fim, conjecturei que todo o fenômeno até agora mencionado procede do progressivo movimento da luz e da Terra em sua órbita [...]” [2, p. 38]. Com essa descoberta de Bradley e com a sua explicação do fenômeno, a teoria de Roemer foi superada, mas não a sua previsão da finitude da velocidade da luz.

Também no século XVIII, a descoberta de Roemer, corroborada agora pelo trabalho de Bradley, teve um grande impacto na obra de Leonhard Euler (1707-1783) sobre a óptica. Euler físico e matemático suíço construiu as suas próprias teorias físicas sobre a óptica. No tempo de Euler, a óptica estava dividida entre duas abordagens opostas, aqueles que apoiavam a teoria ondulatória da luz e aqueles que apoiavam a teoria corpuscular. Euler aderiu a óptica ondulatória, e ele passou a tratar a luz como um fenômeno cinemático, ele comparou a luz com o som que é transmitido pelo ar, enquanto a luz é transmitida pelo éter [2, p. 43]. Euler pensa que o éter é meio pelo qual a luz se propaga, pois na visão mecanicista da época a luz, sendo uma onda, não poderia se propagar sem a existência de um meio.

Euler também pensa que um raio de luz é caracterizado por sua frequência. Sobre a questão do fenômeno explicado por Bradley, Euler deu uma explicação baseada na sua teoria ondulatória da luz, pois o fenômeno era facilmente explicado pela teoria corpuscular [2]. Foi Euler um dos primeiros estudiosos a usar a letra c , para designar a velocidade da luz, a origem

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

dessa letra vem, provavelmente, da palavra latina, *celeritas* (que significa rapidez em latim), vejamos como Euler se expressa sobre a questão,

... cometeu-se um erro no raciocínio ... a razão desta diferença reside no fato de supormos que a luz como o som se propaga com movimento ondulatório. É sabido que o movimento do objeto que emite os raios não afeta a velocidade deles e na realidade se o meio está em movimento, ele combina o seu movimento com os dos raios. Deste modo ele acelera ou retarda a propagação das ondas conforme o movimento do meio segue ou opõem-se aos movimentos dos raios. É claro que argumentamos de igual forma para a luz e para o som... Uma perfeita semelhança será conservada se a luz for emitida não por um fenômeno ondulatório, mas por emissão de corpos luminosos. Se nós considerarmos que as partículas de luz que constituem o raio são injetadas de corpos em repouso com velocidade c que atribuiremos à luz, então se esses mesmos corpos se movem, eles acrescentarão o seu movimento ao dos raios, mas quer o meio se mova, ou esteja em repouso, ele não afetará de todo o movimento dos raios que pode ser considerado vazio... [2, p. 43-44].

Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) um físico francês fez estudos mais concretos sobre a propagação da luz; o seu trabalho principal se concentra no século XIX, aqui sob a influência de Thomas Young (1773-1829) que com a divulgação do seu famoso *experimento da fenda dupla*, mostrou inequivocamente que a luz é um tipo de onda. Foi Fresnel quem tornou a aceitação da teoria ondulatória da luz quase um fato inquestionável. Ele estuda o fenômeno da aberração da luz estelar que fora explicado por Bradley, ele segue Euler e os demais físicos de sua época que sustentavam que a luz se propaga no éter; é de Fresnel a tentativa de explicar de forma satisfatória o problema da aberração [2]. Segundo [2], Fresnel supõe a “densidade do éter” difere para as diferentes substâncias, então se assumimos que a densidade do éter no espaço seja ρ e num outro meio qualquer seja ρ' , “Fresnel assume que a velocidade de propagação em qualquer meio varia inversamente à raiz quadrada da densidade do éter naquele meio” [2, p. 46]. E, assim, temos a fórmula elaborada por ele,

$$\sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} = \frac{v}{v'} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

Sendo i e r os ângulos de incidência e de refração, respectivamente e v e v' são as velocidades da luz nos diferentes meios de propagação. Essa fórmula de Fresnel também pode ser entendida no contexto da velocidade da luz, pois já era sabido desde a época de Huygens que a luz se propaga com velocidades distintas nos diferentes meios, e Fresnel dizia que o quando o éter é arrastado para outro meio sua velocidade deve ser determinada pela equação $\rho'v' = (\rho' - \rho)v$, de forma que, a equação para a velocidade v' é tal que,

$$v' = \left(1 - \frac{\rho}{\rho'}\right) \cdot v = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdot v$$

A equação de Fresnel foi comprovada pela experiência de Sir George Airy (1801-1892) ele mediu o ângulo de aberração da luz usando um telescópio cheio de água, Airy verificou o

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

ângulo de aberração é o mesmo para o telescópio cheio de ar ou de água [2]. Esse experimento foi suficiente para mostrar a validade da fórmula empírica de Fresnel.

Seja AP a direção do eixo do telescópio e PP' a direção da luz incidente proveniente do espaço, se for considerado que o telescópio é meramente um tubo vazio, apenas formado pelo ar dentro de sua cavidade interna, observe que a direção de PP' segue de P para B' ; o segmento $P'B'$ representa a velocidade da luz no vácuo c , enquanto que $A'B'$ é uma determinada velocidade v , ou seja, v é a velocidade do observador, a linha PQ é a direção do raio retratado, de acordo com [2], quando o telescópio é cheio de um meio refrativo, o eixo AP é normal à superfície refletora e então o ângulo de incidência é $A'PB'$ e se o tubo do telescópio está vazia, então o mesmo deve ser apontado na direção a $A'P'$.

Mantenha a direção do telescópio apontada para a direção $A'P'$ e encha o tubo do mesmo com uma substância com um certo índice de refração, devido a tal substância o telescópio tem um desvio de sua posição inicial de tal modo que a nova direção passa a ser a linha AP que é paralela a $A'P'$, e assumindo que a linha PQ representa a velocidade da luz na substância refratora em repouso. Se não houver o arrastamento, a luz não atingirá o ponto Q , a menos que o ponto A atinja B que, por sua vez, são determinados pela relação $AB = v = A'B'$. Por outro lado, se assumirmos que há o arrastamento da luz, então a luz se move partindo de P não seguirá na direção PQ , pela ação do meio ela seguirá a linha PB , “se PB é tal que $AB = v$, então o arrastamento é tal que ocorreu uma compensação completa” [2]. Portanto, é do nosso interesse quantificar essa modificação, para isso, faça QB ser a velocidade do arrastamento, e essa última é a razão na qual a luz é arrastada na direção do movimento, e seja $QB = v'$, então podemos escrever,

$$AQ = v - v'$$

De onde tiramos a seguinte proporção,

$$\frac{v - v'}{v} = \frac{AQ}{PQ} = \frac{\text{sen } r}{\text{sen } \theta}$$

Porém, se assumimos que $A'P'B' = APB' = i$, e lembrando também que A relação entre as velocidades da luz nos meios e os índices de refração é dada por $v = c/n$,

$$\frac{\text{sen } \theta}{\text{sen } i} = \frac{c}{v}$$

Combinando a última equação com a primeira, obtêm-se,

$$\frac{v - v'}{v} = \frac{\text{sen } v}{\text{sen } c} = \frac{v}{nc}$$

E, disso resulta o seguinte,

$$v - v' = \frac{v^2}{nc} = \frac{v}{n^2}$$

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

E, por fim, podemos escrever que,

$$v' = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdot v$$

E, portanto, temos comprovada a lei de Fresnel, essa é uma relação para entender como a luz se refrata ao passar entre meios com diferentes índices de refração, a diferença nas velocidades da luz entre dois meios pode ser descrita em termos do índice de refração, confirmando assim a lei de Fresnel.

Figura 6. Esquema geométrico da experiência de Airy. Adaptada de [2].

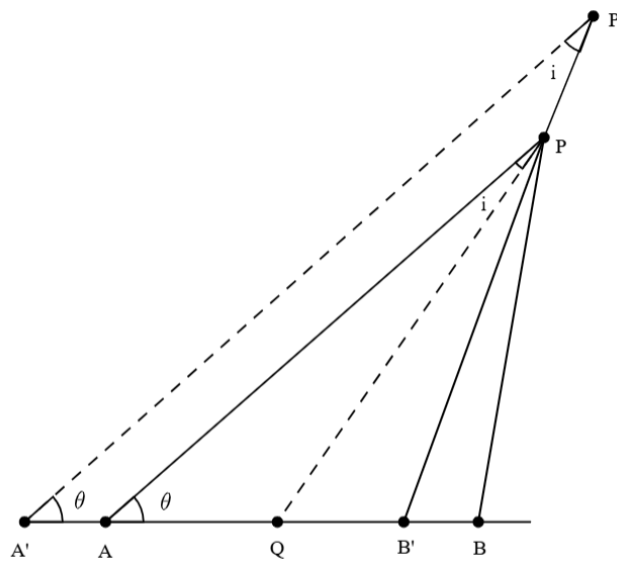
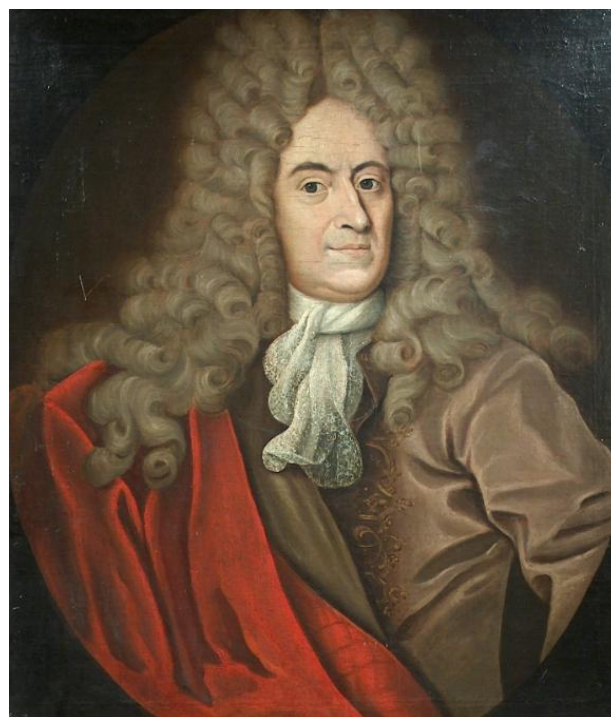
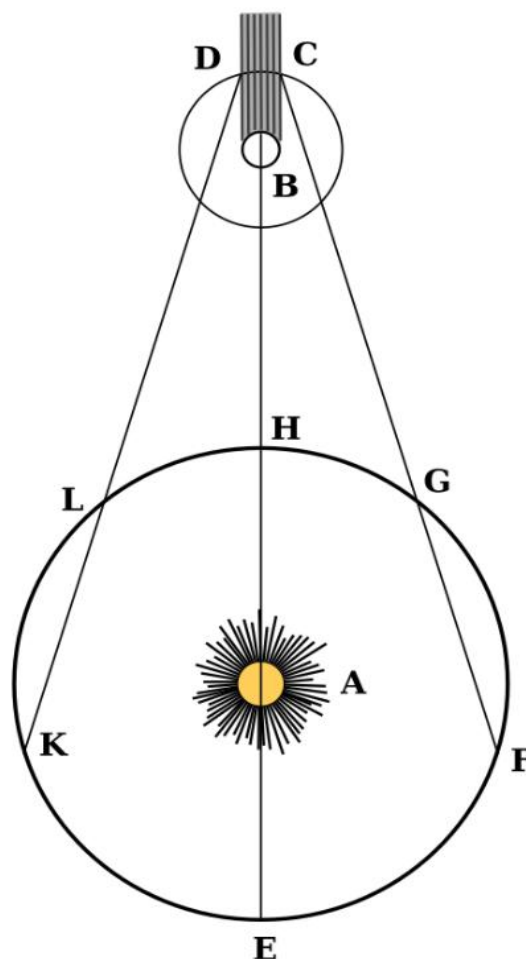
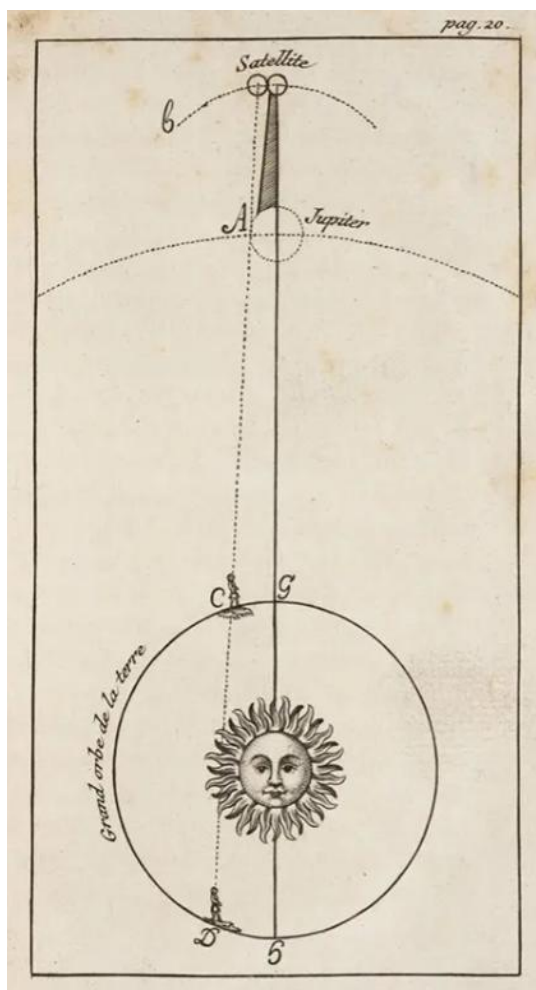


Figura 7. Retrato de Ole Rømer o Astrônomo real dinamarquês. [5]



As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

Figura 8 – Diagramas representando o fenômeno das emersões e imersões do primeiro satélite de Júpiter [14, 15]



6. REFERÊNCIAS

MARTINS, Roberto M; Silva. C. C. **As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 4, 4202, 2015.

SILVA, R. M. **Experiências históricas para a determinação da velocidade da luz.** Dissertação (mestrado em física) – Faculdade de ciências, Universidade do Porto. Cidade do Porto, p. 158, 2013.

ROSA, C. A. P. **História da ciência.** 2ª ed. Vol. 3. Brasília: Fundação Alexandre de Gusmão, 2012.

DARRIGOL, Oliveier. **A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century.** Oxford: Oxford University Press, 2012.

As investigações e os experimentos históricos que levaram a determinação da velocidade da luz: parte 2

COHEN, I. B. **Roemer and first determination of the velocity of light**. New York: The Burndy Library, 1944.

LAPORTE, Rafael S. **Ole Roemer e a velocidade da luz: explorando aspectos da natureza da ciência em uma proposta de ensino**. Dissertação (mestrado em física) – Programa de Pós-Graduação do Instituto de Física, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, p. 115, 2017.

TOSSATO, Claudemir R. **Os fundamentos da óptica geométrica de Johannes Kepler**. *scientiæ zudia*, São Paulo, v. 5, n. 4, p. 471-99, 2007.

ROEMER, O. **Demonstration concerning to the motion of light**. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 12, p. 893-894, 1677.

ROEMER, O. **Démonstration touchant le mouvement de la lumière**. *Journal des Sçavans*, 1676.

GALILEI, G. **Dialogues concerning Two New Sciences**. New York: The Micmillian Company, 1914.

PRESTON, T., **Theory of Light**. Macmillan And CO., Limited St. Martins Street, London, 1928.

WALLER, R. **Essayes of Natural Experiments made in the Academie del Cimento**. New York: Johnson Reprint Corporation, 1964.

KRISTERSEN, L. K.; PERDERSEN, K. M. **Roemer, Jupiter's satellites and the velocity of light**. *Centaurus*, v. 54, n. 1, p. 4-38, 2012.

[13] A fonte se encontra em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ole_R%C3%B8mer_-_Obser._Primi_Jovialium_Parisiis_-_pp1%2B4.jpg

[14] A fonte da imagem se encontra no livro: *Voltaire's Elémens de la philosophie de Neuton*, 1738.

[15] A fonte da imagem se encontra em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Roemer-Jupiter_moons-Speed_of_light.svg

NOTAS

ⁱ Uma efeméride (do grego *εφημερίς*) é uma tabela astronômica em que, com intervalos de tempo regulares, registra-se a posição relativa de um astro.

ⁱⁱ Imersão é o ato ou efeito de imergir (-se); imergência, submersão e, em astronomia, significa o momento do desaparecimento de um astro, ao ser ocultado por outro.

ⁱⁱⁱ Emersão, trata-se de ato de emergir, de vir ou trazer à tona e, em astronomia, fenômeno da reaparição de um astro depois de ter sido eclipsado pela sombra ou interposição de um outro.