UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

RAFAEL SOBRINHO LAPORTE

Ole Roemer e a velocidade da luz: explorando aspectos da natureza da ciência
em uma proposta de ensino.

São Carlos

2017

RAFAEL SOBRINHO LAPORTE

Ole Roemer e a velocidade da luz: explorando aspectos da natureza da ciência em uma proposta de ensino.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Física Aplicada
Orientador: Prof^a. Dr^a. Cibelle Celestino Silva

Versão Corrigida

(versão original disponível na Unidade que aloja o Programa)

São Carlos
2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica revisada pelo serviço de biblioteca e informação do IFSC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Laporte, Rafael Sobrinho

Ole Roemer e a velocidade da luz: explorando aspectos da natureza da ciência em uma proposta de ensino / Rafael Sobrinho Laporte; orientadora Cibelle Celestino Silva - versão corrigida -- São Carlos, 2017.

115 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada) -- Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017.

1. História da ciência. 2. Ole Roemer. 3. Velocidade da luz. 4. Natureza da ciência. 5. Ensino de astronomia. I. Silva, Cibelle Celestino, orient. II. Título.

À todos aqueles que já morreram,
cujo legado respiramos todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família, especificamente meus pais Hélio e Laura, que apesar de não compreenderem e concordarem com grande parte das minhas escolhas, jamais cogitaram a possibilidade de desistir de mim e por isso, tornaram-se essenciais para a conclusão efetiva deste trabalho. Independente de nossas diferenças, suas trajetórias de vida sempre me servirão de inspiração e exemplo para aquisição de todos meus sonhos.

Agradeço a todos os amigos que passaram pelo meu caminho ao longo de todos esses anos, que contribuíram, cada um à sua maneira, para tornar esta jornada mais rica e agradável. Sobretudo, devo agradecer especialmente aos meus amigos Guilherme, Virgínia, Millena Logrado, José Francisco (vulgo “Chico”, “Cara” ou “Jibóia”) e Estêvão, não somente por me fornecerem um apoio imprescindível em meus momentos mais terríveis e obscuros, mas também por serem os únicos que até então efetivamente compartilham comigo o sentimento sublime de existir: assim como eu, vocês entendem que ser consciente, em qualquer escala, traz simultaneamente liberdade e amargura. Conversar com vocês é oxigênio.

Agradeço aos professores que colaboraram de forma pertinente na minha educação, especialmente ao meu professor do ensino médio, Fábio, que foi o primeiro responsável por despertar meu interesse em Física e também ao meu ex-orientador Rodrigo Gonçalves Pereira, por sempre me motivar e incentivar a seguir meus objetivos.

Também agradeço àqueles que contribuíram de alguma forma com a conclusão do meu trabalho, seja tirando dúvidas, indicando referências, dando ideias ou até mesmo me fornecendo um local para morar durante este período. Nesse sentido, agradeço ao Professor Gustavo de Araujo Rojas por contribuir com informações relevantes para interpretar algumas informações que usei em meu trabalho. Agradeço também ao meu amigo Lucas Nardi por me ajudar com parte dos processos burocráticos. Em especial, agradeço ao Professor Ricardo Karam, do Departamento de Didática da Ciência da Universidade de Copenhagen, que me enviou um artigo essencial para a conclusão de minha pesquisa.

Deixo meus profundos agradecimentos à minha orientadora Cibelle Celestino Silva, que além de me acolher em uma etapa tão turbulenta da minha vida, sempre teve muita paciência comigo, me fornecendo todas as condições possíveis para concluir este trabalho à minha maneira não convencional de trabalhar. Imagino o quanto este período pode ter sido cansativo para você. Nunca me esquecerei de todas as nossas conversas sobre a vida, nem de

todos os ensinamentos e incentivos que você me ofereceu durante este tempo e nem mesmo que *“ars longa, vita brevis”*.

Por fim, agradeço à população brasileira, especialmente àqueles que sequer tem a oportunidade de saber que poderiam estar no meu lugar, por financiarem meus estudos, ainda que o façam de forma totalmente inconsciente. Espero poder retribuir este esforço de uma forma realmente significativa no futuro.

RESUMO

LAPORTE, R. S. **Ole Roemer e a velocidade da luz**: explorando aspectos da natureza da ciência em uma proposta de ensino. 2017 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos , Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Nos últimos anos, o uso e a reprodução de experiências históricas têm sido objeto de pesquisa no contexto da educação científica. Desde os antigos gregos, sempre existiram idéias controversas sobre a finitude da velocidade da luz. Ao longo do século XVII, filósofos e astrônomos como Descartes, Galileu, Cassini e Huygens estiveram envolvidos com essa questão. Em 1676, Ole Roemer previu que o eclipse da lua mais próxima de Júpiter ocorreria exatamente dez minutos depois do tempo calculado com base nos eclipses anteriores. A confirmação dessa previsão é considerada evidência irrefutável a favor da finitude da velocidade da luz. O presente trabalho apresenta um estudo histórico sobre o desenvolvimento e aceitação da hipótese de Roemer e uma sequência didática com o objetivo de explorar o debate sobre a finitude da velocidade da luz em cursos de graduação. A sequência didática inclui a contextualização histórica do episódio pelo estudo de fontes secundárias e a reprodução das medidas de Ole Roemer através de um software que simula o céu. Além de ensinar conteúdos básicos de Astronomia, a sequência didática também visa discutir os aspectos da Natureza da Ciência, como a relação entre os antecedentes teóricos e os experimentos, a precisão das medidas e as influências históricas, políticas e sociais na aceitação de ideias.

Palavras-chave: História da ciência. Ole Roemer. Velocidade da luz. Natureza da ciência. Ensino de astronomia

ABSTRACT

LAPORTE, R. S. **Ole Roemer e a velocidade da luz**: explorando aspectos da natureza da ciência em uma proposta de ensino. 2017 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Since the Ancient Greeks, there have always been controversial ideas about the finiteness of the speed of light. Along the seventeenth century, philosophers and astronomers like Descartes, Galileo, Cassini and Huygens were involved with this question. In 1676, Ole Roemer predicted that the eclipses of the innermost Jupiter's moon would occur exactly ten minutes later than the time computed based on the previous eclipses. The confirmation of this prediction is considered as irrefutable evidence in favor of the finiteness of the speed of light. This work presents a historical study about the development and acceptance of Roemer's hypothesis and a didactical sequence aiming to explore the debate about the finiteness of the speed of light in science teaching courses. The activities are devoted to undergraduate students of Physics and Science Teaching. The didactical sequence includes the historical contextualization of the episode by the study of secondary sources and reproduction of Ole Roemer measurements through the use of a software that simulates the sky. Besides teaching basic astronomy contents, the didactical sequence also aims to discuss Nature of Science aspects such as relation between theoretical background and experiments, precision of measurements and the historical, political and social influences on the acceptance of scientific ideas.

Keywords: History of science. Ole Roemer. Speed of light. Nature of science. Astronomy education.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Ilustração de uma câmara escura, no qual a luz proveniente de um objeto luminoso incide em uma pequena fenda. Ao ser refratada, a luz projeta a imagem do objeto no fundo da parede da câmara, de forma invertida. Esta é a ilustração de <u>Gemma Frisius</u> , primeira publicação de figura de sua câmara escura, em 1545 no livro <i>De Radio Astronomica et Geometrica</i>	28
Figura 2 -	Processo de formação de imagem em nossa retina. O objeto luminoso VXY transmite seus raios de luz para o olho, os quais sofrem diversas refrações até chegarem na retina em TSR. Esta figura foi originalmente feita por Descartes, com o intuito de explicar o modelo de visão de Kepler	29
Figura 3 -	Imagem utilizada por Descartes para explicação de seu experimento, sugerido para demonstrar a propagação instantânea da luz. A figura ilustra o momento de colinearidade do sistema Sol-Terra-Lua, representados respectivamente pelas letras A, B e C	32
Figura 4 -	Imagem utilizada por Huygens para explicar a proposta dos eclipses lunares de Descartes. Nela, estão representados o Sol imóvel em A, uma parte da órbita anual da Terra ao redor do Sol pelo arco BD e a órbita da Lua ao redor da Terra pela circunferência que contém CG.....	34
Figura 5 -	Ilustração utilizada por Descartes para explicar seu modelo de reflexão da luz, no qual ele compara o fenômeno ao movimento de bola de tênis lançada por uma raquete	37
Figura 6 -	Figura utilizada por Descartes para explicar a de refração. Analogamente ao caso da reflexão, ele compara a refração da luz com a incidência de uma bola de tênis em um superfície plana, que neste caso é menos rígida, como uma lona	39
Figura 7 -	Figura ilustrativa da movimentação dos astros, utilizada por Roemer para explicar suas medidas. O Sol está representado pelo ponto A e Júpiter pelo ponto B. Os pontos E, F, G, H, L e K representam a Terra em diversos pontos da sua trajetória ao redor do Sol, enquanto os pontos C e D representam os pontos de início e término dos eclipses da lua Io de Júpiter	48
Figura 8 -	Manuscrito de Ole Roemer, contendo as datas referentes às observações dos eclipses de Io no disco de Júpiter dos anos de 1668 a 1678. Roemer dividiu seus dados em nove períodos, separando as imersões e emersões do satélite.....	50
Figura 9 -	Gráfico da relação Tempo Solar Aparente das observações pelo Número	

	de Revoluções de Io. Através de uma regressão linear, calculamos a reta que melhor se ajusta aos pontos. O coeficiente angular B do gráfico determina o período médio de Io entre as datas 24/10/1671- 20/02/1672, enquanto o coeficiente linear A corresponde à data de oposição dentro deste mesmo intervalo.....	54
Figura 10	Modelo para cálculo da distância Terra-Júpiter quando a Terra se encontra em diferentes pontos de sua órbita. Na figura, a circunferência centrada em S representa a trajetória da Terra ao redor do Sol e Júpiter no ponto J, que nesta situação podemos considerar imóvel em relação a Terra. O ponto O corresponde à posição da Terra quando esta se encontra em oposição com Júpiter, enquanto as retas $\overline{AJ}$ e $\overline{BJ}$ correspondem à distância entre a Terra e Júpiter em dois pontos distintos da trajetória terrestre	57
Figura 11	Ilustração utilizada por Christiaan Huygens para explicar a transmissão da luz no éter. Nessa ele assume que uma esfera maciça A irá colidir com a esfera B que se encontra em contato com outras esferas C. Após a colisão, todo o movimento será transmitido para as esferas C, de maneira que as esferas A e B fiquem paradas	62
Figura 12	Na figura a) ilustra a propagação sucessiva das ondas esféricas no modelo de Huygens. Cada um dos pontos A, B e C, representados na chama de uma vela, emite continuamente ondas esféricas que são representadas por círculos concêntricos em torno destes pontos. Esta propriedade se aplica a todos os pontos da superfície da chama. Já a figura b) ilustra o funcionamento do princípio de superposição de ondas esféricas de Huygens. Nessa imagem, o ponto A representa uma fonte luminosa, que tem como frente de sua onda esférica o arco DCF. Todos os outros pontos também produzem suas próprias ondas esféricas, que irão todas tangenciar a frente esférica DCF	63
Figura 13	Ilustrações utilizadas por Huygens para explicar o fenômeno de óptico de reflexão e refração. Na figura a, AC corresponde a frente de onda incidente em um plano BA, gerando a onda refletida de frente de onda BN. Aqui, os ângulos de incidência e reflexão equivalem aos ângulos CBA e NAB respectivamente. Já na figura b temos que AC corresponde à frente de onda incidente para um meio mais denso, separados pela interface AB, produzindo uma frente de onda refratada AN. Os ângulos de incidência e refração correspondem respectivamente a EAD e FAN ...	65
Figura A1 -	Tela principal do <i>Stellarium</i> . Nela temos dois menus principais: um de configurações gerais do programa, localizado à esquerda da tela, e outro de controle das animações, na horizontal. Os principais botões do programa se encontram numerados de 1 a 11	87
Figura A2 -	Janela de pesquisa do <i>Stellarium</i> . Através dela, é possível localizar um corpo celeste no céu através de uma lista ou simplesmente digitando o nome do corpo desejado	88
Figura A3 -	Janela de visualização do <i>Stellarium</i> . Aqui podemos alterar diversas	

propriedades de visualização do programa. Para o nosso propósito é interessante notar a opção ‘ <i>Simular a velocidade da luz</i> ’, destacada em vermelho na figura. Ativando esta caixa, o programa levará em conta o tempo que a luz necessita para viajar do astro até o observador para simular a posição dos corpos celestes no céu	89
Figura A4 - Janela de data e hora do <i>Stellarium</i> . Nela podemos especificar um determinado horário para observar o céu, através do calendário tradicional ou em dias julianos	90
Figura A5 - Janela de localização do <i>Stellarium</i> . Aqui é possível alterar o local de onde serão realizadas as observações, digitando o nome da cidade ou especificando suas coordenadas geográficas	90
Figura A6 - Sistema de zoom do <i>Stellarium</i> . As figuras demonstram um zoom no planeta Saturno, o suficiente para se poder ver a órbita de seus satélites .	92
Figura B1 - Imagem de simulação no <i>Stellarium</i> na qual configuramos o programa para observar Júpiter a partir da cidade de São Carlos. Na circunstância mostrada, temos que o planeta se encontra acima de 60° de altura no período da noite, o que revela que nesta data Júpiter provavelmente se encontrará observável na prática	94
Figura B2 - Simulação no <i>Stellarium</i> de um zoom no planeta Júpiter, alguns instantes antes do início da imersão de Io em seu disco. Na prática, esta imersão não pode ser observada em condições normais pois ela irá ocorrer em um momento do dia em que o Sol ainda se encontra alto.....	95
Figura B3 - Procedimento para determinação do horário da emergência de Io no <i>Stellarium</i> . Para contornar este problema, pode-se simplesmente selecionar Io e acompanhar o movimento do satélite através do cursor vermelho de seleção. Esta é uma excelente aproximação, tendo em vista que o cursor possui praticamente o mesmo diâmetro do astro selecionado	96
Figura B4 - Observação da segunda emergência através do <i>Stellarium</i> . Como no caso anterior contornamos o problema do desaparecimento do Satélite através do cursor de seleção	97
Figura B5 - Emergência de Júpiter na data 28/05/2017 observada pela simulação do <i>Stellarium</i> . Nesta situação consideramos que o fim do eclipse ocorreu às 19:38:06, exatamente 1 minuto após a medida utilizada nos cálculos anteriores	100

SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
2	Concepções sobre a velocidade da luz e sua finitude.....	21
2.1	Ideias referentes a velocidade da luz e sua finitude ao longo da história - da Antiguidade até início do Século XVII	21
2.2	Concepções de René Descartes sobre a luz	30
2.3	As demonstrações de Descartes das leis da reflexão e refração da luz	36
3	A questão da velocidade da luz no século XVII.....	45
3.1	O problema da determinação da longitude e as observações de Júpiter.....	45
3.2	Ole Roemer e a velocidade da luz	46
3.3	Como Roemer possivelmente obteve a estimativa de 11 minutos?	49
3.4	O modelo óptico de Christiaan Huygens e a velocidade da luz	59
3.4.1	A Propagação da luz no modelo de Huygens e sua aplicação nos fenômenos de Reflexão e Refração.....	62
3.5	A aceitação das ideias de Roemer	64
4	A História da Ciência no ensino de ciências	71
4.1	Porque usar História da Ciência no ensino de Ciências? Uma breve discussão sobre a Natureza da Ciência e seus benefícios.....	71
4.2	O que pode ser aprendido com o episódio histórico estudado?.....	75
4.3	Proposta de roteiro didático envolvendo o episódio histórico de Roemer	77
5	Conclusão	103
	REFERÊNCIAS	105
	ANEXO A – trecho da carta de Fermat para Mersenne, na qual ele critica a demonstração de Descartes para a reflexão da luz.	109
	ANEXO B – tradução da versão em inglês da divulgação dos resultados de Roemer publicado pelo Journal des Sçavans	111
	ANEXO C – versão em inglês da divulgação dos resultados de Roemer publicado pelo Journal des Sçavans	113

1 Introdução

É comum observar que muitas pessoas possuem uma concepção ou entendimento sobre alguma ideia sem necessariamente investigar de maneira crítica se ela de fato faz sentido. Isso muitas vezes ocorre de forma inocente, pois ao longo de nossas vidas somos expostos a um grande número de informações sobre diversos assuntos distintos, seja na escola, no trabalho ou mesmo no convívio familiar e social. Parte dessas informações são assimiladas de forma passiva, sem nunca passarem por um processo de investigação mais consciente.

Alguns exemplos relacionados a isso encontram-se no cotidiano, como o fato de que muitas pessoas acreditam em ideias como “comer manga com leite” ou “tomar banho após uma refeição” podem fazer mal à saúde. No primeiro caso, podemos compreender que se passa de um mito fazendo alguma abstração mais simples, como por exemplo constatar a existência e consumo de *sorvete de manga* (que é produzido com leite e manga). Já no segundo pode se tratar de um conhecimento incompleto da informação: atualmente entendemos que durante a digestão ocorre um aumento da concentração de sangue em nosso aparelho digestivo. Assim se outro processo ocorrer em nosso corpo exigindo o aumento do fluxo de sangue em outros órgãos (como para a esquentar a pele no caso de um banho frio ou para movimentar os músculos no caso de uma atividade física como a natação), pode fazer com que o coração não consiga bombear todo o sangue necessário para os demais órgãos, prejudicando o organismo. No entanto, banhos com água morna ou quente não produzem um choque térmico no organismo, e portanto não fazem mal algum. (1)

Apesar destes exemplos parecerem muito simples por serem facilmente esclarecidos à luz de um pouco de informação e bom senso, o ponto principal que desejo chamar atenção é que muitas ideias pré-concebidas por nós jamais voltam a ser questionadas. Por esta mesma razão, pode ainda acontecer de acreditarmos estar certos sobre algum assunto por julgar que este é muito mais simples do que de fato é. Assim, ocorre de informações descuidadas como estas serem transmitidas em forma de conhecimento válido, como muito frequentemente observado em casos de educação e divulgação científica, até mesmo por especialistas. (2, *3-4)

* Id., 2017, p. 21-22

No geral, observamos uma forma não crítica de se aprender ciência em nosso sistema educacional. Os livros didáticos de ciência geralmente enfatizam a apresentação dos resultados dos modelos teóricos científicos atualmente aceitos, oferecendo ferramentas técnicas para interpretação e aplicação dos mesmos. (5) Neste processo, acaba-se deixando de lado outras questões importantes sobre a natureza da ciência: como os conceitos e ideias se desenvolvem? Como se dá o processo de aceitação destas ideias? Como fatores sociais, históricos e econômicos podem influenciar a produção e desenvolvimento científico? As teorias e modelos científicos atualmente aceitos são universais? Qual a relevância e fundamentação dos conceitos estudados? (5-6*,7[†]-8)

Este lado do conhecimento muitas vezes é esquecido, proporcionando ao aluno uma experiência de aprendizado passiva e operacional, gerando um distanciamento da possibilidade de adquirir uma postura auto-reflexiva e realística sobre o desenvolvimento criativo humano. (2[‡],9[§]) Neste contexto, a história da ciência tem sido empregada como ferramenta didática fundamental na solução destes desafios. (2^{**},7-8,10-11^{††})

Dessa forma, este trabalho tem como principal objetivo apresentar o desenvolvimento histórico de um tema de Física, e a partir disto propor uma atividade didática que possa ser aplicada no ensino de ciências, tanto para nível médio quanto superior. O tema escolhido refere-se essencialmente às ideias sobre a *velocidade da luz*. Através de um olhar histórico do assunto, acreditamos ser possível mostrar que questões relacionadas ao conhecimento humano dificilmente são tão simples como tradicionalmente apresentadas. Assim, este trabalho pode ser usado como uma ferramenta para acessar o tema sobre a ótica de um paradigma mais crítico e realista. (2^{‡‡})

O estudo sobre a velocidade da luz pode ser abordado de diversas formas distintas, no entanto a pergunta que deu origem a este estudo foi: “*Atualmente, qual o episódio histórico que consideramos como evidência empírica da primeira constatação da finitude da velocidade da luz?*” Para responder e analisar esta questão com alguma propriedade, devemos conhecer um pouco do panorama geral envolvendo o tema ao longo da história. No capítulo 2 deste trabalho, apresentamos a concepção da velocidade da luz sob a perspectiva de diversos

* Id., 2016, p. 674-676.

† Id., 2016, p. 4-9.

‡ Id., 2017, p. 22-23.

§ Id., 1985, p. 119-124.

** Id., 2017, p. 24-25.

†† Id., 1995, p. 185-191.

‡‡ Id., 2017, p. 9-22.

pensadores como Aristóteles, Ptolomeu, Ibn Al-Haitham^{*}, Kepler, Galileu, Descartes, Fermat entre outros, compreendendo o período que vai da Antiguidade até o século XVII. O objetivo desta parte é mostrar a evolução[†] do conceito de velocidade da luz até o episódio histórico em estudo, mostrando como estas ideias foram aplicadas na explicação de diversos fenômenos naturais, como a reflexão e refração da luz. Somente conhecendo as referências históricas dos pensadores, será possível fazer uma leitura não anacrônica dos eventos que envolveram a primeira medição da velocidade da luz.

No capítulo 3 apresentamos o contexto histórico que levou astrônomos do século XVII a se envolverem com a produção de tabelas de efemérides[‡] dos eclipses dos satélites de Júpiter. Foram durante estas observações que perceberam certas irregularidades nos horários dos eclipses da lua Io, as quais foram justificadas por Ole Roemer através da hipótese de que a luz necessita de tempo para viajar de Júpiter até a Terra. Em 1676, Roemer previu através de suas hipóteses que um determinado eclipse de Io ocorreria 10 minutos depois do horário estimado, afirmando ainda que tempo que a luz necessita para percorrer o raio da órbita terrestre corresponde a 11 minutos. A previsão de Roemer é considerada atualmente como a primeira constatação empírica de que a luz possui velocidade finita.

Além do desenvolvimento das ideias de Roemer apresentaremos como estas foram pertinentes para a complementação do modelo óptico de Christiaan Huygens, que usou medidas de Roemer para calcular a velocidade da luz, obtendo um valor de aproximadamente 230.000 km/s (cerca de 76% do valor atualmente aceito). Discutimos por fim a razoabilidade da hipótese de Roemer, por uma análise crítica de suas medidas e da aceitação de suas ideias no período. Sendo esta última fortemente influenciada pela crítica do astrônomo Jean-Domenico Cassini, que embora também havia notado as mesmas irregularidades em Io, discordava da explicação de Roemer.

No capítulo 4, discutimos de que forma este episódio histórico pode ser utilizado no ensino de ciências como ferramenta para compreender aspectos da natureza da ciência. Para isso, mostramos alguns elementos interessantes do episódio histórico narrado sugerindo uma proposta de atividade didática para ser aplicada para alunos de ciências para nível médio ou

^{*} Também conhecido por Alhazen.

[†] Apesar do termo ‘evolução’ ser preciso, é comum ocorrer o equívoco de acreditar que este sugere que as ideias melhoram com o passar do tempo, o que não é verdade. O termo não possui a intenção de hierarquizar, mas sim de sugerir um processo de mudança natural.

[‡] As efemérides astronômicas são o calendário de ocorrência de eventos astronômicos, como eclipses, cometas e até mesmo da posição dos astros.

superior. Além do desenvolvimento teórico das ideias através da leitura de textos e discussão oral, sugerimos também a possibilidade do aluno simular as medidas de Roemer pelo software gratuito de simulação planetária *Stellarium* para estimar a velocidade da luz. Esta proposta acompanha um tutorial de utilização do programa para os fins desejados e a sugestão de um roteiro didático a ser seguido pelo professor na aplicação da atividade.

2 Concepções sobre a finitude da velocidade da luz

2.1 A velocidade da luz e sua finitude ao longo da história - da Antiguidade até início do Século XVII

A discussão referente à velocidade da luz e sua finitude abrange um grande período histórico. Por se tratar de um problema fundamental de óptica, é razoável esperar que sempre que qualquer fenômeno envolvendo a luz era estudado, questões referentes a sua velocidade fossem levantadas.

Na Antiguidade, grande parte dos pensadores aceitavam que a velocidade da luz era infinita. (12*) O pré-socrático Empédocles de Acragas (490-435 A.C.) discordou dessa ideia. Em sua denominada ‘Teoria da Emissão’, ele argumentava que a existência de todas as coisas eram constituídas por quatro elementos: terra, água, fogo e ar. Sendo nossos olhos constituídos pela base elemental do fogo. No sentido proposto por Empédocles, eles seriam os responsáveis pela produção da luz que tornaria nossa visão possível. Assim, o fogo em nossos olhos emitiria luz, que se movimentaria com velocidade finita até um determinado objeto, iluminando-o e tornando-o visível. (13†)

Filósofos como Platão (427-347A.C.) e Euclides (320-270A.C.) admitiram a explicação de Empédocles (13‡). A maior objeção a essa explicação se deve a Aristóteles (384-322 A.C.) que defende que a luz não deve ser um movimento e portanto, não é possível falar sobre sua velocidade. (13§)

*“Empédocles (e com ele todos aqueles que usaram das mesmas formas de expressar) estava errado em dizer que a luz 'viajava' ou que estava em um dado momento entre a terra e seu receptor, sendo seu movimento não observável para nós; este ponto de vista é contrário tanto à clara evidência do argumento quanto aos fatos observados; se a distância percorrida fosse curta, o movimento poderia ser inobservável, mas quando a distância é de extremo leste para extremo oeste, somos forçados cada vez mais a acreditar nisso.” (14**)*

Para Aristóteles a luz não corresponde a uma emissão corpuscular e nem é emitida por nossos olhos. Além disso ele defendia a existência de um meio entre o observador e o corpo visível, pois se existisse um espaço vazio entre o olho do observador e um objeto, seria impossível ver o mesmo. As análises desse meio levaram Aristóteles a definir um conceito próprio de transparência da luz: para ele, a transparência é o meio através do qual podemos

* Id., 1944, p. 8-9.

† Id., 1976, p. 4-6.

‡ Id., 1976, p. 9-17.

§ Id., 1976, p. 6.

** Id., 1967-1968, p. 418b21-26.

ver e a luz é um estado da transparência resultante do fogo ou de outro corpo luminoso qualquer. Sendo o estado de um meio, a luz não necessita de tempo para se movimentar, podendo transitar de um estado potencial para outro de completa transparência, da mesma maneira em que se aceitava que a mudança de estado da água para o gelo ocorria instantaneamente. (13^{*})

A óptica de Euclides também sofreu influências da teoria da emissão, contudo seu modelo era completamente matemático, fundamentado nos princípios da geometria. Para ele, a visão consistia na emissão de raios de luz pelos olhos, em linha reta e formando um cone de luz, de maneira que para um objeto se tornar visível, este deveria ser interceptado por este cone. Este modelo permitiu que ele tratasse os problemas de óptica sob uma ênfase completamente geométrica, evitando qualquer discussão de natureza física de seus resultados. (13[†])

Cláudio Ptolomeu escreveu diversos trabalhos na área de óptica. Como Empédocles e Euclides, Ptolomeu defendia que a visão se devia à emissão de um fluxo de luz, em formato cônico, do olho do observador e que as cores constituem uma propriedade inerente dos corpos. Segundo ele, este fluxo de luz sai continuamente dos olhos do observador e ao atingir um corpo colorido, produz o que entende-se como visão. (13,[‡]15[§])

Em seu livro *Optica*, Ptolomeu tenta deduzir a lei da reflexão comparando os raios visuais refletidos à projéteis rebatidos. Ao se atirar uma bola em uma parede sob ângulos específicos, o movimento é completamente bloqueado na direção na qual a bola fora jogada. Contudo, Ptolomeu argumentou que o mesmo não ocorre na direção tangencial ao movimento, o que pode ser notado através do fato de que uma flecha não se curva devido à aceleração aplicada pelo arco. Assim, a parede é capaz de bloquear completamente o movimento de um objeto na direção que se opõe a ela, mas não afeta o mesmo nas direções tangenciais. (16^{**})

Sendo essa ideia aplicável para tudo que se movimenta, Ptolomeu assumiu que ela também deve ser aplicada aos raios de luz. Assim, um raio de luz que incide perpendicularmente em um espelho é completamente refletido na mesma linha de incidência, enquanto que um raio de luz com incidência tangencial continua seu movimento sem nenhuma alteração. Entre esses dois casos extremos, encontra-se o de incidência oblíqua, no

* Id., 1976, p. 7-8.

† Id., 1976, p. 11-14.

‡ Id., 1976, p. 15-17.

§ Id., 1981, p. 200-201.

** Id., 1967, p. 71.

qual o raio de luz deverá ser refletido simetricamente ao raio de incidência, de maneira que os ângulos de incidência e de reflexão gerados com a normal a superfície refletora devem ser iguais. (16*)

As ideias de Ptolomeu foram desenvolvidas por Ibn al-Haytham (965-1039). Seus trabalhos são grandes referências em óptica do período, nos quais elaborou um detalhado modelo mecânico para explicar diversos fenômenos ópticos, como reflexão, refração, o funcionamento da visão e outros, os quais muito provavelmente influenciaram as ideias de muitos pensadores futuros. (16[†])

Os trabalhos de Ibn Al-Haytham procuram analisar propriedades e efeitos da luz por uma investigação de caráter matemático e experimental. Para ele, a luz é uma forma essencial presente em corpos com luz própria e acidental em corpos opacos, que podem receber essa luz de outra fonte tornando-se uma fonte luminosa. A transparência constitui uma propriedade essencial dos corpos, que permite que a luz seja transmitida após ser recebida de uma outra fonte, como é o caso da água durante a reflexão. (17[‡])

Em seu Livro de *Óptica*, Ibn Al-Haytham busca, entre outros assuntos, explicar os fenômenos de reflexão e refração da luz. Ele argumentou que a luz é refletida devido a uma propriedade existente em corpos refletores denominada ‘força de repulsão’. Esta força deve ser maior em corpos polidos do que ásperos, pois as partes que constituem este corpo devem estar muito próximas, impedindo que a luz se dissipe neles. Dessa forma, a reflexão está associada com quão compacto um corpo polido pode ser e não com sua dureza propriamente dita. (16[§])

Para estudar a reflexão da luz, Ibn al-Haytham primeiramente analisa a reflexão de uma esfera de metal atirada em um espelho plano de cobre colocado verticalmente em uma parede. Quando jogada perpendicularmente ao espelho, a esfera retorna na mesma linha na qual foi atirada. Neste caso de projeção perpendicular, tanto o movimento de incidência da esfera quanto o de oposição atuam na mesma linha, e portanto a esfera será refletida perpendicularmente ao espelho.

Quando a esfera é atirada obliquamente ao espelho, o movimento incidente pode ser dividido em duas componentes, uma perpendicular e outra paralela ao espelho. Dessa forma, a resistência do espelho não se encontra na direção oposta à de incidência, de maneira que o

* Id., 1967, p. 71-72.

† Id., 1967, p. 72.

‡ Id., 1981, p. 191-192.

§ Id., 1967, p. 74.

movimento não pode ser refletido na mesma linha do caso anterior. Contudo, como o espelho impede a continuidade do movimento nesta direção, a componente perpendicular do movimento será destruída, gerando uma nova componente normal no sentido oposto à componente perpendicular incidente, exatamente como no caso de incidência normal. Já a componente paralela do movimento permanecerá inalterada, pois não possui oposição no plano do espelho. Finalmente, o movimento refletido deve ser uma composição da componente perpendicular revertida com a componente paralela inalterada, resultando em um movimento simétrico ao de incidência, isto é, os ângulos dos movimentos de incidência e reflexão com a normal devem ser iguais. Ibn al-Haytham finalmente conclui que o mesmo deve ocorrer para a reflexão da luz, com a diferença que a luz continuará indefinidamente em linha reta, na direção determinada pela reflexão, o que não ocorrerá com a esfera de metal devido ao seu peso. (16*)

Para explicar a refração, Ibn al-Haytham inicialmente argumenta que a luz se move com grande velocidade em corpos transparentes, e sua velocidade deve ser maior em corpos menos densos, pois esta propriedade oferece resistência ao movimento da luz. Assim, quando a luz atinge a superfície de um corpo mais denso, seu movimento deve ser alterado. Porém, quando a resistência desta superfície não é forte o suficiente para impedir completamente o movimento da luz, como na reflexão, a luz somente terá seu movimento enfraquecido.

Ibn al-Haytham explica que a componente perpendicular da incidência é mais forte que a componente paralela. Isso é justificado por ele através do fato de que corpos são rompidos mais facilmente quando atingidos na direção perpendicular às suas superfícies, como é o caso de uma espada cortando um pedaço de madeira mais facilmente quando aplicada perpendicularmente.

Assim, baseado nesta ideia, durante a refração a componente perpendicular manterá sua direção inalterada. O mesmo deve ocorrer com a componente paralela do movimento. Contudo, nesta direção, Ibn al-Haytham assume que a luz sofrerá uma resistência mais significativa do meio, fazendo com que a velocidade nesta direção seja diminuída. Dessa forma, na refração de um meio menos denso para um mais denso, como por exemplo do ar para a água, a luz se aproximará da linha normal à superfície de incidência. Já no caso contrário, como no da refração da água para o ar, a luz irá se afastar da linha normal devido ao fato da componente horizontal ter sua velocidade aumentada. (16†)

* Id., 1967, p. 75-76.

† Id., 1967, p. 93-97.

Muitos pensadores tiveram suas ideias influenciadas pelos estudos de Ibn al-Haytham, como é o caso de Roger Bacon (1214-1292). Bacon entendia que a luz era uma propriedade imaterial que se propagava com velocidade finita, fazendo menção às ideias de que corpos refletem a luz devido a sua densidade e não sua dureza ou solidez. Também utiliza a analogia da esfera de metal atirada em uma superfície rígida para explicar que um raio de luz somente retorna na mesma linha de incidência se esta ocorrer perpendicularmente à superfície refletora. (18*) Apesar dessas semelhanças, Bacon não admitia que os fenômenos ópticos pudessem ser efetivamente explicados por um modelo mecânico. Como para ele a luz não é um corpo, sua reflexão não pode ocorrer da mesma maneira que uma bola ricocheteada em uma parede. Neste caso, Bacon não entendia o desvio da luz como um processo de repulsão e sim como um mecanismo de auto-replicação: a superfície refletora ofereceria uma oportunidade para a luz se multiplicar em outra direção diferente daquela que incidiu. (16†)

Galileu Galilei (1564-1642) também discutiu a finitude da velocidade da luz e em seu livro *Diálogos sobre Duas Novas Ciências*, no diálogo entre Salviati e Simplicio, Galileu propõe um experimento para se medir a velocidade da luz:

“Simplicio: Todos os dias a experiência mostra que a propagação da luz é instantânea; como quando nós vemos um projétil de artilharia disparado, a uma grande distância, a luz atinge nossos olhos sem lapso de tempo, porém o som atinge o ouvido apenas após um notável intervalo.

Salviati: A pequena conclusão desta e de outras observações similares me levaram a um método decisivo no qual se poderia verificar precisamente se a iluminação, isto é, se a propagação da luz é realmente instantânea. O fato é que a velocidade do som é tão alta quanto nos é assegurado que o movimento da luz não pode deixar de ser extraordinariamente veloz. O experimento que idealizei é como se segue: Deixe que cada uma de duas pessoas fique com uma luz contida em uma lanterna, ou outro receptáculo, de maneira que pela interposição da mão, um seja capaz de desligar a luz ou permitir que a luz para a visão do outro. Depois permita que eles fiquem em oposição ao outro a uma distância de alguns cúbitos‡ e praticar até eles adquirirem tal habilidade em revelar e ocultar suas luzes que no instante em que um vê a luz de seu companheiro ele irá ocultar a sua própria. Após alguns ensaios de resposta eles estarão prontos para que sem um erro sensível a ocultação de uma luz será seguida imediatamente pela revelação da outra, de modo que assim que um expor sua luz ele irá instantaneamente ver a luz do outro. Tendo adquirido habilidade a esta pequena distância, permita com que os dois experimentadores, equipados como antes, tomem posições separados por uma distância de duas a três milhas e deixe que repitam o mesmo experimento a noite, notando cuidadosamente se as exposições e ocultações ocorrem da mesma maneira como em pequenas distâncias; se o fizerem, nós podemos seguramente concluir que a propagação da luz é instantânea; mas se é requerido tempo a uma distância de três milhas na qual, considerando a ida de uma luz e a vinda da outra, resultem em seis, então o atraso deve ser facilmente observado. Se o experimento é para ser feito a distâncias ainda maiores, digamos oito ou dez milhas, telescópios podem ser empregados, cada observador ajustando um para si mesmo no local onde ele está para fazer o

* Id., 1981, p. 379.

† Id., 1967, p. 76-77.

‡ O cúbito corresponde a um valor entre 45 a 50 cm (20).

experimento a noite; em seguida embora as luzes não sejam grandes e então invisíveis a olho nu a grandes distâncias, eles podem prontamente cobrir e descobrir com a ajuda de um telescópio, uma vez ajustados e fixados, eles se tornarão facilmente visíveis.” (19)*

O experimento proposto por Galileu foi executado pela *Accademia del Cimento* de Florença e nenhum atraso fora observado:

“Galileu no primeiro diálogo de seu Tratado de Duas Novas Ciências sugere um maneira fácil de descobrir, se a luz se move no tempo, ou com uma velocidade instantânea: a tentativa consiste no trabalho conjunto de dois homens para expor luzes para a visão do outro. Então com a revelação de um, o outro pode responder imediatamente a isso: que quando um revela sua luz e a expõe, eles podem ao mesmo tempo perceber a luz de seus companheiros. Sendo praticado frequentemente a pequenas distâncias Galileu desejou ter o mesmo tentado pelos observadores a uma distância maior; para ver, se a correspondência mútua da exposição e revelação de suas luzes, mantém a mesma medida de quanto próximas; isto é, sem nenhum atraso observável.

Nós tentamos isto a milhas de distância, que considerando a ida e volta da luz deve ser considerada o dobro, e não pudemos observar nenhum efeito. Se em maiores distâncias é possível observar qualquer atraso sensível, nós ainda não tivemos a oportunidade de tentar.” (21†)

Apesar deste resultado, ainda não era possível afirmar que a luz se propagava com velocidade infinita, pois ainda que realizado a grandes distâncias, o experimento estava limitado à distâncias dentro do globo terrestre‡.

Galileu apresentou outro argumento a favor da finitude da velocidade da luz: ao observar o flash de luz produzido por um raio entre as nuvens, vemos a luz localizada em uma determinada região e em seguida notamos que ela se espalha para outras regiões próxima. Assim, segundo Galileu, se a propagação da luz fosse instantânea, não seria possível distinguir entre as áreas iniciais e finais do clarão. (12§)

Johannes Kepler (1571-1630) defendia a ideia da propagação instantânea da luz, a qual constitui uma das bases de seu modelo óptico de visão. Kepler é geralmente reconhecido como astrônomo, e por suas ‘*Três Leis de Kepler*’ que descrevem propriedades do movimento planetário, mas também possui influentes trabalhos no campo da óptica. Seus interesses em óptica surgiram enquanto trabalhava no observatório de Tycho Brahe (1546-1601), durante as observações de um eclipse solar que ocorreu no ano de 1600. Kepler observou que o diâmetro

* Id., 1914, p. 42-43.

† Id. 1684, p. 157.

‡ Atualmente é possível concluir que este experimento não é suficiente para demonstrar o propósito pelo qual fora concebido: considerando o valor aproximado atualmente aceito para a velocidade da luz, que corresponde a aproximadamente 300.000 km/s, sabemos que, ainda que fosse possível executar o experimento em diâmetros opostos da Terra, cuja distância aproximada equivale a 12.800 km, o atraso sensível esperado por Galileu seria da ordem de milissegundos, o que naturalmente não pode ser detectado pelo reflexo do olho humano.

§ Id. 1944, p. 13.

da Lua era menor que o diâmetro do Sol durante o eclipse em seu estado de Lua cheia. Segundo Brahe, a explicação para este fenômeno se encontrava na óptica e foi por esta orientação que Kepler iniciou seus estudos na área. (13,^{*} 22[†]-23[‡])

No primeiro livro de seu *Paraliponema* denominada *Da natureza da luz*, Kepler apresenta uma série de propriedades da luz, entre elas que ela não é material, não possui peso, nem oferece nenhum tipo de resistência, além de se mover em todas as direções. De certa maneira retornando às ideias Aristotélicas, Kepler entendia que a luz é uma espécie de interação entre os corpos materiais, e sendo esta imaterial, deve ser transmitida instantaneamente. (23[§]-24)

Para Kepler, era necessário compreender com precisão o funcionamento da visão para se compreender qualquer fenômeno óptico. Estudou modelos antigos da visão, principalmente de árabes como o já mencionado Ibn Al-Haitham, os quais considerou falhos em diversos aspectos, principalmente do ponto de vista de conciliar a descrição matemática à anatomia do olho humano. (13^{**}) Assim, Kepler assumiu que ter um bom entendimento da descrição anatômica dos olhos era fundamental para construção de seu modelo. Buscando informações com anatomistas de seu tempo, Kepler concluiu que a formação da imagem de objetos em nossos olhos deve ocorrer na retina e não no cristalino, ao contrário do que grande parte dos filósofos acreditava. (13,^{††} 23^{‡‡})

Primeiramente, Kepler entendia que a luz se propagava na forma de raios de luz e que a imagem de um objeto se formava na retina como se fosse desenhada ponto a ponto por cada um desses raios, que ligam o objeto observado ao olho do observador. Em outras palavras, cada raio de luz proveniente de um objeto luminoso carrega aos nossos olhos a informação de somente um ponto, de maneira que a imagem do objeto é formada pontualmente em nossa retina.

Com essas ideias, o modelo de visão de Kepler possui analogia direta com as projeções de imagens em câmaras escuras nas quais ele trabalhava no observatório de Tycho. Nestas, um objeto iluminado transmite seus raios de luz por uma pequena fresta em uma

^{*} Id., 1967, p. 185-186.

[†] Id., 1981, p. 298-299.

[‡] Id., 2007, p. 474-475.

[§] Id., 2007, p. 478.

^{**} Id., 1967, p. 188-190.

^{††} Id., 1967, p. 190-193.

^{‡‡} Id., 2007, p. 479-484.

câmara fechada, na qual sofre uma refração, e projeta a imagem do objeto invertida na parede do fundo da câmara, exatamente como mostrado na Figura 1. (23*)

Figura 1 – Ilustração de uma câmara escura, no qual a luz proveniente de um objeto luminoso incide em uma pequena fenda. Ao ser refratada, a luz projeta a imagem do objeto no fundo da parede da câmara, de forma invertida. Esta é a ilustração de Gemma Frisius, primeira publicação de figura de sua câmara escura, em 1545 no livro *De Radio Astronomica et Geometrica*

Fonte: TOSSATO. (23)

No caso da visão, cada feixe de luz proveniente do objeto deve sofrer múltiplas refrações dentro do olho convergindo a informação de um ponto para a retina como mostrado na Figura 2. Nela temos o objeto luminoso VXY, do qual incidem três feixes de luz em direção à córnea do olho, representada em ACD, na qual são refratados separadamente. Os raios continuam até atingir o cristalino em L até finalmente convergirem para a retina representada em TSR, formando a imagem. É importante notar que neste modelo, tal como ocorre na câmara escura, a imagem é formada de maneira invertida no olho, bastando notar que o ponto Y do objeto está associado com o ponto T da retina, da mesma forma que o ponto V se encontra associado com o ponto R. (13[†])

Referente à questão da imagem se formar invertida mas ainda assim enxergarmos de forma não invertida, Kepler afirma que aquilo que diz a respeito à interpretação da nossa percepção já não diz a respeito à óptica. Dessa forma, a percepção dos fenômenos luminosos, como as cores e outros aspectos da luz deve ocorrer em virtude de um *espírito visual*, que interpreta a informação óptica que chega até a retina.

* Id., 2007, p. 487-491.

† Id., 1967, p. 193-202.

Figura 2 – Processo de formação de imagem em nossa retina. O objeto luminoso VXY transmite seus raios de luz para o olho, os quais sofrem diversas refrações até chegarem na retina em TSR. Esta figura foi originalmente feita por Descartes, com o intuito de explicar o modelo de visão de Kepler

Fonte: LINDBERG. (13)

Apesar do modelo de Kepler aparentar ser uma adaptação e combinação de ideias de outros autores, deve-se ressaltar que este apresenta mudanças realmente significativas. Ao assumir que a imagem se forma na retina ao invés do cristalino, Kepler foi forçado a considerar a refração de raios de luz que incidem obliquamente na córnea, e não somente os de incidência perpendicular, como foi assumido por muitos modelos de visão anteriores. Além disso, o fato de que os raios de luz necessitam atravessar todo o olho para atingir a retina reforça a característica imaterial da luz, uma vez que não sentimos seu toque em nossos olhos. Como para Kepler a velocidade é uma propriedade de corpos materiais, temos como consequência direta que a luz é transmitida de um objeto luminoso até os olhos instantaneamente. (13*)

* Id., 1967, p. 202-208.

As ideias da óptica de Kepler foram estudadas por muitos pensadores, como é o caso de René Descartes, cuja óptica foi muito influente durante o século XVII.

2.2 Concepções de René Descartes sobre a luz

René Descartes (1596-1650) foi um influente filósofo do século XVII, cujos trabalhos em óptica e outras áreas tiveram grande destaque no período. Em 1637, Descartes publicou um conjunto de três obras, anexos ao seu *Discurso do Método: a Geometria, a Dióptrica e os Meteoros*. Nestes trabalho, Descartes demonstrou e explicou diversos fenômenos ópticos, como os da reflexão e refração da luz, estudada por meio de um modelo mecanicista; discussões sobre a visão; estudo de lentes e apresentação da sua teoria sobre as cores. (25^{*}) Para compreender o modelo de propagação da luz de Descartes, bem como a plausibilidade do impacto de suas ideias na época, é necessário conhecer alguns fundamentos de seu sistema filosófico.

Inicialmente Descartes supôs a existência de uma porção indefinida de matéria em todo mundo, que pode ser organizada de diversas maneiras diferentes, bem como colocada em movimento pela ação de Deus. A partir deste ponto, todo este conjunto de matéria deverá seguir um conjunto de três leis fundamentais, denominadas por Descartes como ‘*Leis da Natureza*’, que foram impostas pelo Criador. (16[†])

A primeira destas leis enuncia que cada parte da matéria deve continuar sendo a mesma desde que esta não seja forçada a mudar devido a uma interação com outra parte da matéria. Na segunda lei, ele enuncia que quando duas parcelas de matéria se chocam, uma delas deve perder a exata quantidade de movimento que a outra adquire. E finalmente sua terceira lei estabelece que quando um corpo é colocado em movimento, este tende a permanecer em linha reta até que seja forçado a se mover de maneira diferente da atual. (16[‡])

Com este conjunto de leis fundamentais, Descartes sugere que podemos descrever qualquer fenômeno natural. Explicando a formação dos astros, ele divide a organização da matéria em três categorias: utilizando a terceira lei, temos que todo o suposto aglomerado de matéria inicial era incapaz de possuir um movimento retilíneo devido ao ambiente sólido da aglomeração. Dessa maneira, diversas partes da matéria executam um movimento circular em volta de diversos centro diferentes. Neste processo, ocorre o choque entre diferentes partes da

^{*} Id., 2015, p. 4202-4203.

[†] Id., 1967, p. 51.

[‡] Id., 1967, p. 50-53

matéria, fazendo com que algumas porções da mesma sejam separadas na forma de planetas, gerando o que Descartes denominou de Terceiro Elemento. Os agrupamentos de partículas menores que acabam por gerar um fluido que preenche todo o vazio entre os corpos maiores é chamado de Segundo Elemento. Por fim, o Primeiro Elemento corresponde às porções de matéria ainda menores que as do Segundo Elemento, que preenchem os vazios restantes e sua acumulação é responsável pela formação do Sol e demais estrelas. (16,^{*}26[†])

Luz para Descartes corresponde à tendência ao movimento que se propaga através de colisões e que são recebidas e transmitidas através do Segundo Elemento. (26[‡]) Descartes faz a analogia da visão com a utilização de uma bengala por um cego: ao tocar os objetos, a bengala transmite vibrações para as mãos do cego, que percebe os objetos sem exigir que nenhuma matéria percorra a bengala até as mãos. Analogamente, a luz necessita de um meio para ser transmitida sem que haja transporte de matéria. (25[§]) A propagação instantânea da luz é consequência direta deste modelo adotado por Descartes:

“E sabendo que as partes do segundo elemento tocam e pressionam uma às outras o tanto quanto possível, nós não podemos duvidar que a ação pela qual a primeira é empurrada, deve passar em um instante pelas outras partes: da mesma maneira como a ação pela qual a ponta de um 'graveto' é pressionada, transmite para outra ponta no mesmo instante.” (27^{**})

Temos aqui que a suposição fundamental de Descartes era a de que a luz corresponde a uma determinada tendência de movimento que deve ser transmitida a qualquer distância através de um meio que permeia tudo. Com esta *causa*, Descartes explica diversos *efeitos* da luz. Grande parte destes efeitos eram conhecidos de experiência cotidiana, como por exemplo os fatos de que dois raios de luz não se interrompem durante uma superposição ou mesmo que os ângulos de incidência e reflexão de um raio de luz são iguais. (16^{††}) Assim, baseado na veracidade destes experimentos cotidianos (isto é, sem realizar uma prova destas premissas), ele poderia demonstrar a existência de outros efeitos.

Apesar de ser capaz de explicar fenômenos como reflexão e refração, a hipótese da infinitude da velocidade da luz foi criticada, como por exemplo pelo filósofo Isaac Beeckman (1570-1637). Para mostrar que a luz se propagava com velocidade finita, propôs o seguinte experimento: um observador deveria ser colocado diante de um espelho a uma distância tal

^{*} Id., 1967, p. 53-54.

[†] Id., 1987, p. 13-15.

[‡] Id., 1987, p. 16-19.

[§] Id., 2015, p. 4202-4203.

^{**} Id., 1897-1913, p. 84.

^{††} Id., 1967, p. 20-24.

que ainda seja possível para o observador ver seu próprio reflexo. Se o experimento for realizado a noite, segurando uma tocha, o observador deve acenar para o espelho. Dessa forma, o intervalo de tempo entre o movimento da tocha segurada pelo observador e o movimento do reflexo da tocha, deveria ser proporcional a duas vezes a distância entre o observador e o espelho. Beeckman diz ter executado o experimento com um espelho posicionado a uma distância de aproximadamente 2025 jardas* e afirmou ter encontrado um atraso.[†] (28[‡])

Descartes em uma carta para Beeckman datada de 22 de agosto de 1634, menciona a existência de um experimento a favor da propagação instantânea da luz e que seria suficiente para contestar as ideias de Beeckman. (29[§])

Figura 3 – Imagem utilizada por Descartes para explicação de seu experimento, sugerido para demonstrar a propagação instantânea da luz. A figura ilustra o momento de colinearidade do sistema Sol-Terra-Lua, representados respectivamente pelas letras A, B e C

Fonte: DESCARTES. (29)

Assumindo como verdadeira a hipótese de que a velocidade da luz seja finita, Descartes argumenta que, ainda que fosse possível para Beeckman detectar um atraso da ordem de um intervalo de tempo correspondente $1/24$ de uma pulsação cardíaca humana (aproximadamente $1/24$ segundos), isso deveria corresponder a uma velocidade da luz de tal magnitude que o atraso observado no experimento de Descartes deveria ser da ordem de uma hora, e portanto impossível de ser observado.

Sua proposta consistia em considerar os eclipses lunares como representado na Figura 3, causados pela interposição da Terra, representada na posição B e com a Lua em C. Tal eclipse deve ser observado quando a luz emitida pelo Sol em A for refletida pela Lua retornando para a Terra, sem que esta tenha sido interrompida no trajeto inicial Sol-Lua, representado por AC. Conhecendo a distância BC entre a Terra e a Lua, a qual ele considerou como sendo 50 raios terrestres** e a velocidade da luz obtida pelo modelo de Beeckman para um atraso de $1/24$ segundos, Descartes estimou que a luz demoraria um intervalo de meia

* 1 jarda ~ 90 centímetros. Logo, 2025 jardas ~ 1,82 km.

[†] Hoje podemos inferir que Beeckman dificilmente poderia ter observado tal atraso. Conhecendo o valor atual da velocidade da luz, isto é 299.792.458 km/s, sabemos que o atraso da luz nas condições do experimento de Beeckman deveria ser da ordem de 10 microssegundos, o que claramente não poderia ser detectado.

[‡] Id., 1986, p. 3-4.

[§] Id., 1897-1913, p. 309-312.

** 50 raios terrestres equivalem a aproximadamente 222.320 km. O valor atualmente aceito corresponde a cerca de 60 raios terrestres.

hora para percorrer a distância Terra-Lua BC.^{*} (28[†]) Dessa forma, o eclipse seria observado após passado uma hora do momento da colinearidade entre os astros. Isto evidentemente contraria as observações astronômicas, nas quais a colinearidade entre os astros aparenta ocorrer no mesmo instante no qual o eclipse lunar é observado. Uma vez que o atraso não foi detectado mesmo com grandes distâncias, Descartes estabeleceu que ainda que a velocidade da luz seja finita, esta deveria ser muito maior do que aquela estimada por Beeckman, concluindo portanto que este provavelmente estava enganado. (29[‡])

A ideia de propagação instantânea da luz é premissa fundamental do trabalho de Descartes, como ele relata na mesma carta para Isaac Beeckman:

“Eu disse recentemente, quando estávamos juntos, não de fato como você escreveu que a luz se move em um instante, mas que ela alcança nossos olhos vinda de um objeto luminoso em um instante; e eu ainda acrescentei que para mim isto é tão certo, que se isso pode ser provado falso, eu estarei pronto para confessar que não sei absolutamente nada de filosofia.” (29[§])

Sabemos que diferente de Galileu e Beeckman, Descartes não admitiu a possibilidade da magnitude da velocidade da luz ser tão alta, o que o levou a acreditar que a estimativa de que a luz demora 30 minutos para percorrer a distância Terra-Lua era razoável. Além disso, havia questões de natureza teórica para Descartes considerar a propagação da luz instantânea: com vimos, a luz para Descartes consistia na tendência de movimento produzida através da colisões entre dois meios e transmitida instantaneamente através dos mesmos.

Esta questão foi discutida posteriormente por Christiaan Huygens (1629-1695) em seu *Tratado sobre a Luz*. Adepto da propagação sucessiva da luz, Huygens, dissertando sobre a demonstração de Descartes, concorda que os atrasos na observação dos eclipses lunares deveriam de fato ocorrer, mas argumenta que estes são muito pequenos para serem notados.

^{*} A velocidade em questão refere-se a luz percorrer 2 vezes as 2025 jardas de Beeckman em 1/24 segundos, isto é uma velocidade de $2.1,82.24 \sim 87,5$ km/s. Assim o tempo para a luz percorrer o trajeto Terra-Lua deve corresponder a $222.320/87 \sim 42,3$ min. Isso significa ao estimar o limite inferior de 30 minutos, Descartes supôs uma velocidade da luz ainda maior do que àquela fornecida pela estimativa de Beeckman.

[†] Id., 1982, p. 3-5.

[‡] Id., 1897-1913, p. 307-312.

[§] Id., 1897-1913, p. 307-308.

Figura 4 – Imagem utilizada por Huygens para explicar a proposta dos eclipses lunares de Descartes. Nela, estão representados o Sol imóvel em A, uma parte da órbita anual da Terra ao redor do Sol pelo arco BD e a órbita da Lua ao redor da Terra pela circunferência que contém CG

Fonte: HUYGENS. (30)

Huygens estabelece que o Sol está imóvel em A enquanto a Terra e a Lua percorrem suas respectivas órbitas, representadas pelas circunferências que contém os arcos BD e CG respectivamente (Figura 4). O holandês supõe que a luz percorre o trajeto Terra-Lua em um intervalo de 1 hora, assim quando a Terra estiver em B, sua sombra será produzida em C após 1 hora, o que será visto da Terra somente uma hora depois. Dessa forma, considerando que após duas horas a Terra se encontrará no ponto E e a Lua em G, o eclipse lunar em C será observado da Terra em E, formando o ângulo $\widehat{GÊC}$, o qual Huygens estimou ser da ordem de 33 graus. Esta estimativa contraria a observação, pois o eclipse é observado quando $\widehat{GÊC}$ é aproximadamente nulo, isto é, no momento de colinearidade entre os três astros.

Contudo, Huygens ressalva que nesse raciocínio foi empregado um valor para velocidade da luz tal que esta demoraria um intervalo de 1 hora para percorrer o trajeto BC. Se, no entanto, a hipótese fosse de que a luz necessita de 1 minuto para realizar o percurso, Huygens estima que o valor do novo ângulo $\widehat{GÊC}$ deve ser da ordem de 33 minutos. Se necessitar de 10 segundos, então o ângulo deveria ser próximo de 6 minutos. Dessa forma, nestas circunstâncias a velocidade da luz pode ser imaginada como sendo tão grande quanto se queira, de maneira que o ângulo $\widehat{GÊC}$ seja tão pequeno a ponto de não ser observável. Com isso, Huygens afirma que é impossível se estabelecer uma conclusão a partir dos argumentos propostos por Descartes. (30*)

* Id., 1986, p.13-14.

Apesar da estimativa utilizada por Descartes para o valor da velocidade da luz ser razoável para o período,^{*} ele não poderia ter considerado seu argumento dos eclipses como uma demonstração conclusiva. A questão fundamental sobre o experimento proposto por Descartes é que para se calcular o atraso, deve-se conhecer a posição dos astros (Terra e Lua) nos instantes de colinearidade nos quais o eclipse é observado, de maneira independentes, como mostrado na Figura 4 pelas posições B e C. Contudo, estas medidas só podem ser realizadas conhecendo-se a velocidade da luz, pois Descartes possuía informações somente do momento em que ele observou o eclipse, o equivalente a posição E na mesma figura.

Robert Hooke (1635-1703) também critica a ideia de Descartes envolvendo a observação de eclipses como evidência a favor da hipótese da infinitude da velocidade da luz, explicando que desconhece uma maneira de demonstrar que a luz se propaga instantaneamente:

“Não conheço nenhum experimento ou observação que possa provar isto [propagação instantânea da luz]. E, enquanto pode ser contestado que ao vermos o amanhecer do Sol precisamente no instante em que ele está na linha do horizonte, vemos uma Estrela escondida pelo corpo da Lua no mesmo instante, quando a Estrela, a Lua e nossos olhos estão todos na mesma linha; estas mesmas observações, ou suposições, podem ser instigantes. Tendo que responder a isto, posso facilmente negar o que afirmam, [...] Se de fato a propagação for muito lenta, é possível que algo grande seja descoberto nos eclipses da Lua; embora nós possamos admitir que a progressão da luz da Terra para a Lua, e da Luz de volta para a Terra possa ocorrer em 2 minutos, não conheço nenhum meio para descobrir isto, ou melhor, talvez possam existir alguns exemplos de Eclipses Horizontais que aparentam ser muito a favor dessa suposição de progressão mais lenta da luz do que a maioria imagina. E o mesmo pode ser dito dos Eclipses do Sol e etc.” (31[†])

Hooke argumenta que Descartes assume como hipótese aquilo que desejava provar, de maneira que o argumento dos eclipses se apoia no fato de que a luz deve possuir uma velocidade específica para que os fenômenos sejam observados como descritos, isto é, Descartes não considera os possíveis casos em que a velocidade da luz seja ainda maior do que aquela admitida por ele inicialmente. Apesar desta crítica, Hooke não desenvolve nenhuma argumentação de natureza teórica ou experimental para defender especificamente a questão.[‡]

^{*} A velocidade do som representava um bom parâmetro de velocidade alta e correspondia a um valor médio de aproximadamente 300 m/s. Estimar que a luz demora cerca de 30 minutos para percorrer a distância Terra-Lua corresponde a dizer que a luz se propaga com aproximadamente 200 km/s, ou seja, com velocidade muito maior que a do som.

[†] Id., 1665, p.57.

[‡] Os trabalhos de Hooke em óptica sugerem que este se posicionava a favor da propagação sucessiva (velocidade finita) da luz (16).

Pelo exposto acima, pode-se notar que na época não havia consenso sobre a finitude ou infinitude da velocidade de propagação da luz. Apesar disso, Descartes aplicou seu modelo para explicar muitos dos fenômenos óticos conhecidos, o que adicionou credibilidade a suas ideias e o tornou um respeitado pensador sobre o tema.

2.3 As demonstrações de Descartes das leis da reflexão e refração da luz

Para explicar os fenômenos óticos de refração e reflexão, Descartes comparou a trajetória dos raios de luz com a de uma bola de tênis atirada contra uma superfície rígida. Como visto na seção 2.1, modelos semelhantes já haviam sido adotado por Ptolomeu e Ibn al-Haytham e mais tarde aproveitado por outros pensadores.

Descartes imagina que o movimento da bola de tênis ocorre na direção da semi-reta AB sob o plano CE, como mostrado na Figura 5. Traçando uma circunferência com centro em B e contendo o ponto A, ele lança a hipótese de que o tempo que a bola necessita para percorrer a distância AB será o mesmo que esta levará para percorrer a distância entre B e qualquer outro ponto da circunferência. Assim, traçando-se as retas AC, HB e FE, de maneira que AH=FH, pode-se dizer que uma vez que a bola está se movimentando para a direita e em direção ao ponto B, ela certamente cruzará com algum ponto da reta AC e consequentemente com algum ponto da reta FE saindo de B. Contudo, a única maneira da bola cruzar um ponto destas duas retas no mesmo intervalo de tempo em que esta percorre a distância AB seria se ela atingisse os pontos D ou F, interceptados pela circunferência. Mas, uma vez que a superfície CE impede a passagem da bola para atingir o ponto D, devemos concluir que esta deverá ser refletida indo em direção ao ponto F. (16,^{*32†})

^{*} Id., 1967, p. 83-85.

[†] Id., 1984, p. 494-495.

Figura 5 – Ilustração utilizada por Descartes para explicar seu modelo de reflexão da luz, no qual ele compara o fenômeno ao movimento de bola de tênis lançada por uma raquete.

Fonte: DESCARTES. (33)

Para deduzir a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão, Descartes assume duas hipóteses. A primeira delas consiste em dizer que a superfície não irá alterar a velocidade da bola durante a colisão, isto é, sendo as velocidades de incidência e reflexão dadas respectivamente por v_i e v_r :

$$v_i = v_r.$$

Em sua segunda hipótese, Descartes assume que a componente do movimento da bola de tênis paralela à superfície não será afetada pela colisão. Sendo i e r , respectivamente, os ângulos de incidência e reflexão feitos com a normal a superfície, Descartes argumenta portanto que:

$$v_i \cdot \text{sen}(i) = v_r \cdot \text{sen}(r) .$$

Juntando as duas hipóteses, ele conclui:

$$\text{sen}(i) = \text{sen}(r) ,$$

$$i = r.$$

A demonstração da igualdade dos ângulos de incidência e reflexão revela-se como uma preparação do leitor para a explicação da refração. Pode-se perceber isso notando que Descartes não se preocupou em elaborar muito ou fechar seus argumentos durante suas considerações para o caso da reflexão. Como exemplo, ele não se ocupou em discutir o que

ocorreu com a componente perpendicular ao movimento da bola de tênis, ainda que seja possível inferir através de seu modelo que esta somente terá seu sentido invertido. Contudo, Descartes não se esqueceu deste fato e como será visto adiante, voltou a ele ao discutir a refração.

Acredita-se que o modelo de colisão utilizado por Descartes para demonstração das leis da reflexão e refração possui influências daquele utilizado por Ibn-al-Haytham em seus estudos de óptica. No entanto, ao contrário de Descartes, este acreditava que a luz devia possuir menor velocidade em meios mais densos. Por não assumir que a componente paralela da velocidade se mantinha constante, Ibn-al-Haytham não chegou aos mesmos resultados de Descartes para a lei da refração. (16*) O caso da refração pode ser entendido como um caso particular da reflexão em que a componente perpendicular à superfície entre os meios da velocidade da bola de tênis sofre uma perda ou acréscimo. Este resultado está completamente de acordo com o modelo formulado desde o início por Descartes, fazendo com que suas demonstrações e analogias não pareçam somente uma adequação matemática de seu modelo aos resultados.

Descartes analisa o fenômeno da refração utilizando a mesma analogia entre raio de luz e o movimento de uma bola. Ele supõe agora que a colisão da bola de tênis não com uma superfície sólida, mas agora com algo menos rígido, como uma lona. Na Figura 6 a bola se move na direção AB e colide com a lona CE em B, perfurando-a. O caminho natural da bola seria continuar na direção BD, contudo, Descartes supõe que a bola perde metade de sua velocidade durante a colisão, de maneira que o tempo gasto para percorrer a distância entre as retas AC e HB deve corresponder a metade do tempo para se percorrer a distância entre as retas HB e FE. Como o ponto I é o único ponto que intercepta a reta FE com a parte de baixo da circunferência, Descartes conclui que seria impossível a bola atingir qualquer outro ponto.

* Id., 1967, p. 96-99.

Figura 6 – Figura utilizada por Descartes para explicar a de refração. Analogamente ao caso da reflexão, ele compara a refração da luz com a incidência de uma bola de tênis em um superfície plana, que neste caso é menos rígida, como uma lona

Fonte: DESCARTES. (33)

No entanto, como Descartes propõe em seu modelo que a luz só pode ser produzida pela matéria, é necessário fazer uma adaptar a analogia da bola de tênis, estabelecendo que ao contrário da última, a luz deve penetrar mais facilmente em um meio à medida que este for mais denso:

Uma vez que a luz pode ser produzida apenas em matéria, onde há mais matéria esta é produzida mais facilmente, outras coisas sendo iguais; portanto ela penetra mais facilmente através de um meio mais denso do que através de um meio mais rarefeito.” (33)*

Dessa maneira, em um caso em que a incidência da luz ocorreria do ar para água, Descartes argumenta analogamente ao caso da lona, simplesmente assumindo agora que a bola irá adquirir uma velocidade na colisão com a superfície, fazendo com que a nova direção do seu movimento se aproxime à reta BH normal a CE. (16[†])

Para provar matematicamente a lei da refração, Descartes lança mão de duas hipóteses. A primeira delas é:

* Id., 1897-1913, p. 242-243.

† Id., 1967, p. 110-111.

$$v_r = n \cdot v_i,$$

isto é, a velocidade de refração v_r deve ser proporcional a velocidade de incidência v_i por uma constante n . Esta equação implica que a velocidade da luz corresponde a uma propriedade do meio em que se encontra.

A segunda hipótese corresponde, como na reflexão, em assumir que a componente horizontal da velocidade, paralela à superfície de incidência se mantém constante durante todo o processo:

$$v_i \cdot \text{sen}(i) = v_r \cdot \text{sen}(r),$$

onde i e r , correspondem aos ângulos de incidência e refração formados na Figura 6 pelos raios de luz AB e BI com a reta normal à superfície BH entre os dois meios. Juntando estas duas hipóteses, vem que:

$$\text{sen}(i)/\text{sen}(r) = v_r/v_i = n \Rightarrow \text{sen}(i) = n \cdot \text{sen}(r)$$

que corresponde a lei da refração ou lei dos senos.

Apesar de obter resultados significativos, existe uma aparente contradição entre o modelo da luz de Descartes e suas analogias para explicação dos fenômenos de reflexão e refração: como o raio de luz pode ser comparado a uma bola de tênis se este deve ser entendido como uma tendência de movimento que se transmite instantaneamente através de um meio, e não como um movimento propriamente dito? Para resolver este problema Descartes propôs que deveríamos considerar esta tendência de movimento como um ‘movimento em potencial’, o qual deveria seguir as mesmas leis já propostas por ele. Assim, os resultados obtidos estudando a reflexão e refração de um corpo em movimento, poderiam ser considerados válidos para luz. (16*)

O problema reside em como devemos interpretar as velocidades v_i e v_r da bola, uma vez que para Descartes não faz sentido falar em *velocidades* para a luz. Em outras palavras, devemos encontrar o análogo de ‘*velocidade*’ entre as ações da luz no modelo de Descartes. A resposta é que Descartes foi associou essas velocidades à força responsável por determinar a direção de transmissão da luz, apesar de ainda não ficar completamente claro na obra de Descartes que espécie de força é essa que permite que a luz seja refletida ou refratada de um ponto para outro, ou mesmo favorecê-la em um meio mais denso. Apesar de entendermos que

* Id., 1967, p. 79-80.

neste contexto os termos ‘força’ e ‘velocidade’ designam coisas muito próximas, em nenhum momento de sua obra Descartes usa a palavra ‘velocidade’ para se referir a alguma propriedade da luz, empregando o uso da palavra “força.” (16*)

A legitimidade das leis matemáticas da reflexão e refração de Descartes foram questionadas pelo matemático francês Pierre de Fermat (1607-1665). Segundo Fermat, no caso da reflexão, dividir o movimento em componentes paralela e perpendicular à superfície refletora representa uma escolha particular de um infinito número de sistemas de referências que poderiam ser adotados, tornando assim a demonstração de Descartes completamente arbitrária. Para defender seu raciocínio, Fermat demonstrou que utilizando outro sistema de eixos obtia-se resultados diferentes daquele encontrado por Descartes, como é possível verificar em uma carta escrita para o Padre Mersenne Marin (1588-1648) em setembro de 1637. (34-35[†])

Nesta carta, Fermat explica que utilizando outras componentes para a velocidade, é possível obter que os ângulos de incidência e reflexão são iguais se definidos em relação a reta BH da Figura 5, e não à reta normal, como sugerido pela segunda hipótese do modelo de Descartes. Este privilegia um sistema onde a componente horizontal do movimento da bola deve ser paralela à superfície refletora bem como os ângulos de reflexão e incidência devem ser definidos através da normal à mesma. Isto é justamente o que Fermat aponta como arbitrário, uma vez que o modelo de Descartes representa uma escolha particular entre infinitos outros sistemas de referência.

No entanto, Descartes responde que as ideias de Fermat, embora estivessem corretas, possuem natureza completamente matemática, o que não estava correlacionado com a interpretação física adotada por ele. (16[‡]) Para o historiador Abdelhamid I. Sabra, Descartes poderia ter utilizado o argumento de que embora Fermat tivesse razão sobre o fato de que o movimento poderia ser realizado e abordado de infinitas maneiras diferentes, o experimento diz que a bola é refletida pela superfície de modo que a componente paralela de sua velocidade se mantém constante enquanto a componente perpendicular tem seu sentido invertido. Com isso, a experiência representava a fundamentação da suposição de Descartes e sua escolha de sistema de referência. A diferença entre ambos é de natureza matemática e metodológica: enquanto Fermat presa pelo rigor matemático, Descartes se apoia na

* Id., 1967, p. 113.

† Id., 1891-1912, p. 109-110.

‡ Id., 1967, p. 91.

experimentação como um caminho para simplificar sua demonstração, e desconsiderando o fato de que as críticas de Fermat eram consistentes do ponto de vista geométrico.

Assim, Descartes se preocupou em apontar que Fermat abordou o fenômeno de forma diferente da sua, e não fez referência ou discutiu maiores detalhes de suas demonstrações. Fermat não ficou convencido com a resposta e em uma última correspondência sobre o assunto, declara para Mersenne:

“Em quatro palavras eu posso interromper nossa disputa sobre a reflexão que, no entanto, eu poderia prolongar ainda mais e provar que o autor [Descartes] acomodou seu meio às suas conclusões, sobre a verdade na qual ele já possuía certeza; se eu negasse que sua decomposição do movimento é a que deve ser considerada, desde que temos um infinito número delas, eu o estaria compelido a provar uma proposição da qual ele iria achar muito embaraçosa.” (35)*

Na crítica de Fermat à refração, ele argumentou que existia uma desconexão entre a base fenomenológica utilizada por Descartes e a matemática: Descartes não especifica a natureza da força responsável pela alteração no movimento da componente perpendicular ao movimento, da mesma forma que não explica porque a componente horizontal da velocidade da bola deve se manter intacta durante a colisão com a lona. Também questiona a afirmação de que a luz se propaga mais facilmente em meios densos.

Em suas respostas para as críticas de Fermat, Descartes não aborda os principais pontos levantados por ele, sugerindo de fato uma certa fragilidade nesta parte de seu modelo, no qual identificamos uma dificuldade da adequação de suas ideias de velocidade de propagação infinita para a luz com suas demonstrações, como ocorre com as velocidades invertidas no caso da refração, que apesar de não serem um problema para seu modelo, representavam uma falha experimental. A negação de Fermat da demonstração de Descartes levou-o a criar sua própria dedução da lei da refração, estabelecendo um princípio matemático de que a luz deveria percorrer a distância entre dois pontos no menor tempo possível.

Existe muita discussão sobre as interpretações de Fermat do argumento de Descartes referente à refração. Especula-se que Fermat pode ter interpretado muito literalmente as ideias de Descartes, apesar de ter se mostrado convicto de que estas possuíam problemas derivados da própria teoria da qual foram gerados.[†] (16[‡])

* Id., 1891-1912, p. 117.

† Para mais detalhes das correspondências entre Fermat e Descartes, bem como a demonstração de Fermat, consultar os capítulos 4 e 5 de *Theories of Light From Newton to Descartes* de A.I. Sabra.

‡ Id., 1967 p. 116-136.

Nesta seção, apresentamos as demonstrações de Descartes da refração e da reflexão da luz, bem como críticas às suas ideias. Apesar das fragilidades, a óptica de Descartes foi muito bem aceita por grande parte de seus contemporâneos, tornando-se referência para muitos pensadores. Como veremos no capítulo a seguir, uma parte considerável da resistência para aceitação das ideias envolvendo a finitude da velocidade da luz se deveu à forte influência de toda a filosofia natural cartesiana neste período.

3 A questão da velocidade da luz na segunda metade do século XVII

3.1 O problema da determinação da longitude e as observações de Júpiter

Um dos grandes problemas científicos e técnicos do século XVII era produzir melhores mapas em comparação com aqueles utilizados na época e para isso era necessário um método para se medir longitudes. Como os únicos pontos de referência em alto mar são o Sol e as estrelas, os navegadores necessitavam de um sistema de coordenadas espaciais do globo terrestre baseado nas observações destes astros. O método utilizado correspondia na orientação através das linhas imaginárias de latitude* e longitude.

O desafio se encontrava na obtenção das longitudes, pois devido ao movimento da Terra no sentido Oeste-Leste, não era possível calcular esta coordenada a partir de observações de um corpo celeste, a menos que se conhecesse o horário exato das observações. Por este motivo, o cálculo das longitudes dependia basicamente de se medir simultaneamente a diferença de tempo entre dois pontos, um de longitude conhecida e outro de longitude a ser determinada. Contudo, devido a ausência de relógios precisos no período, a medição de longitudes representava uma real dificuldade. (36[†])

Uma possível maneira de resolver este problema seria encontrar um fenômeno astronômico que pudesse ser observado simultaneamente em dois locais distintos do globo, para ser usado como um relógio sincronizado. Os eclipses lunares já eram utilizados com esse propósito, no entanto, devido à sua baixa frequência, não era um bom relógio. (37[‡]) Uma solução proposta foi a observação dos eclipses dos satélites de Júpiter: Io, Europa, Ganímedes e Calisto. (37[§]-38^{**}) Como estes eclipses podem ser observados simultaneamente em posições distintas da Terra, este processo possibilitou conhecer a diferença de horário entre um local de referência e qualquer outro ponto do globo. Assim, se um dado eclipse ocorrer com 20 minutos de atraso em relação ao local de referência, por exemplo, pode-se afirmar que a diferença de longitude entre estes dois pontos é de 5°.††

* Para mais sobre o cálculo de latitudes ver (39).

† Id., 2013, p. 1542.

‡ Id., 2008, p. 98.

§ Id., 2008, p. 97-98.

** Id., 1852, p. 76-79.

†† 360° de longitude corresponde a um período de tempo equivalente a um dia terrestre. Como um dia terrestre possui 24 horas, uma diferença de tempo de 20 minutos ($\frac{1}{3}$ de hora) entre o horário medido por dois pontos distintos do globo corresponde a uma diferença de longitude equivalente a $(360/3.24) = 5^\circ$.

O problema se encontrava teoricamente resolvido, sendo necessária apenas a construção de tabelas de efemérides das luas de Júpiter e a presença de um relógio a bordo ajustado no horário local pela passagem meridiana do Sol. Galileu já havia sugerido que os eclipses destes satélites poderiam servir para a determinação de longitudes, porém não chegou a aplicar efetivamente sua ideia por não ter obtido medidas precisas. (38*, 40†)

A *Académie de Sciences de Paris* teve como um de seus primeiros projetos a determinação de longitudes através da observação dos eclipses dos satélites de Júpiter, usando Paris como local de referência para as efemérides. As tabelas utilizadas neste período construídas pelo astrônomo Jean Domenique Cassini (1625-1712). (41‡) Em 1671, trabalhando para o *Observatoire de Paris*, o astrônomo francês Jean Picard (1620-1682) foi enviado para a ilha de Hven com o objetivo de realizar seu projeto de redeterminar a posição do observatório de Uraniborg na Dinamarca, utilizando esse método astronômico. Com isso, seria possível comparar as observações realizadas neste mesmo local por Tycho Brahe entre os anos de 1576 e 1597 (que eram consideradas muito precisas), com aquelas que ainda seriam realizadas pelo *Observatoire de Paris*.

Neste processo, Picard visita o matemático Erasmus Bartholin (1625-1698), o qual também já havia trabalhado com astronomia e especialmente com a não concluída publicação dos manuscritos de Tycho Brahe. (42§) Junto com seu aprendiz Ole Roemer, Bartholin acompanhou Picard até Uraniborg.

3.2 Ole Roemer e a velocidade da luz

Ole Christensen Roemer** (1644-1710) é proveniente de uma pequena família de comerciantes. Em 1662 foi para Universidade de Copenhague, onde recebeu orientação do professor de medicina Thomas Bartholin (1616-1680) e de seu irmão Erasmus Bartholin (1625-1698). Neste período, Roemer estudou astronomia e matemática sob tutoria de Erasmus, o qual confiou a Roemer a tarefa de concluir a edição dos manuscritos não publicados de Tycho Brahe. (43††)

Roemer ficou encarregado desta tarefa até 1671, quando Jean Picard chegou em Copenhagen. Em Hven, na Dinamarca, colaborou com as observações dos eclipses de Io para

* Id., 1852, p. 79.

† Id., 1981, p. 101.

‡ Id., 2012, p. 5-7.

§ Id., 1981, p.481.

** É comum também encontrar seu nome escrito como Ole/Olaus Romer.

†† Id., 1981, p.525.

determinação das coordenadas geográficas do Observatório Uraniborg. No ano seguinte, acompanhou Picard em seu retorno à Paris para trabalhar no então novo *Observatoire de Paris*, onde viveu seus próximos nove anos. No mesmo ano, foi indicado pelo rei Louis XIV para ser tutor de seu filho mais velho Louis de France. (38*, 43†)

Durante sua estadia na França, Roemer foi incumbido de realizar um grande número de observações astronômicas de Júpiter, algumas independentes e outras como assistente de Picard ou Cassini. Nestas observações Roemer notou que o período médio de Io calculado por meio dos horários de imersões de Io era sensivelmente menor do que aquele calculado por meio das emergências. Em 1676, Roemer anunciou para os membros da *Académie de Sciences* que o eclipse do primeiro satélite de Júpiter, previsto para ocorrer no dia 9 de novembro de 1676, às 5h. 25m. 45s. teria um atraso de 10 minutos. Com sua previsão constatada, Roemer atribuiu o atraso ao fato da luz se propagar com velocidade finita, além de estimar que a luz necessitaria de aproximadamente 11 minutos para atravessar o raio da órbita anual terrestre. (12‡) Mais detalhes de como Roemer obteve estes valores serão desenvolvidos na seção 3.3.

Para entender a argumentação de Roemer, consideremos a Figura 7. Nela o Sol está representado em A e Júpiter em B. Os pontos C e D correspondem respectivamente aos momentos em que Io entra e sai da sombra de Júpiter, enquanto os pontos E, F, G, H, L e K representam a Terra em diversas posições de sua trajetória ao redor do sol, onde convencionamos ser no sentido anti-horário. Como o período de revolução de Júpiter corresponde a aproximadamente 12 anos terrestres, podemos considerá-lo como um ponto fixo em relação à Terra.

Uma vez que o período de revolução de Io corresponde a 42,5 horas, se observarmos uma emergência em D em um determinado horário, esperamos que a próxima emergência ocorra exatamente após 42,5 horas no mesmo ponto. Contudo, se a luz possuir velocidade finita, quando a Terra se encontra em K, por exemplo, a observação da emergência em D ocorrerá atrasada em relação ao horário previsto quando a Terra se encontra na posição L de sua órbita. Tal atraso corresponderia ao tempo necessário para a luz percorrer a distância LK. De mesma maneira, uma imersão em C com a Terra no ponto G deve ocorrer antes daquela observada no caso em que a Terra se encontra no ponto F, e analogamente ao caso anterior, esta antecipação se deveria ao tempo necessário para a luz percorrer a distância FG (44).

* Id., 1852, p.461.

† Id., 1981, p.525.

‡ Id., 1944, p. 26.

Figura 7 - Figura ilustrativa da movimentação dos astros, utilizada por Roemer para explicar suas medidas. O Sol está representado pelo ponto A e Júpiter pelo ponto B. Os pontos E, F, G, H, L e K representam a Terra em diversos pontos da sua trajetória ao redor do Sol, enquanto os pontos C e D representam os pontos de início e término dos eclipses da lua Io de Júpiter

Fonte: ROEMER. (44)

Embora a explicação para os atrasos proposta por Roemer nos pareça hoje óbvia, ela não foi imediatamente aceita. Como vimos, as ideias de Descartes sobre a luz eram bem influentes nesta época e ainda não existia uma forma confiável de se medir a velocidade da luz. Neste contexto, Cassini foi a principal personalidade a se opor às ideias de Roemer, apesar dele mesmo ter notado irregularidades nos eclipses de Io justificando essas de outra forma. (40*) As críticas de Cassini são discutidas com mais detalhes na seção 3.5. Antes de entrar na discussão referente a aceitação das ideias de Roemer, devemos conhecer e analisar seu trabalho com maior profundidade, bem como as possíveis influências geradas por seus resultados.

3.3 Como Roemer possivelmente obteve a estimativa de 11 minutos?

* Id., 2012, p. 11-12.

A descrição das observações de Roemer apresentada revela como interpretar o fenômeno observado através da hipótese de que a velocidade da luz é finita. Nesta seção, explicamos como ele possivelmente estimou o valor de 11 minutos para o tempo que luz leva para percorrer o raio da órbita terrestre, através de uma reconstrução envolvendo os dados das observações de Roemer.

Geralmente materiais didáticos e de divulgação* apresentam o trabalho de Roemer afirmando que ele obteve um valor de 11 minutos para a luz cruzar o raio da órbita terrestre. Mas como ele chegou a esse resultado? Para responder a essa pergunta é necessário calcular o período médio de Io em diferentes posições da órbita da Terra, levando em consideração o movimento relativo entre a Terra e Júpiter e usando apenas o horário dos eclipses desse satélite. A partir deste resultado, devemos por fim conciliar os valores obtidos com as interpretações de Roemer, usando somente os conhecimentos da época de forma que a análise não possa vir a ser considerada anacrônica.

Roemer não chegou a publicar um trabalho contendo os dados que levaram as suas conclusões. Contudo, em 1913, Dr. Kirstine Bjerrum Meyer (1861-1941) encontrou na *Royal Library* em Copenhague um manuscrito de 4 páginas referentes às observações de Roemer (41[†]), com os quais foi possível inferir como ele obteve seus resultados. (45) Nesta análise, desenvolvemos de forma mais detalhada as interpretações e os cálculos contidos nos trabalhos de Jerome Bernard Cohen e Leif Kahl Kristensen/Kurt Møller Pedersen, que também levam em consideração os estudos de Meyer. (12,[‡] 41[§])

A Figura 8 mostra parte do manuscrito que contém anotações referentes a diversos eclipses de Io, observados por Roemer e Picard no período de 1668 a 1677. Neste, Roemer dividiu suas observações dos eclipses em nove períodos, separados por imersões e emersões do satélite. A Tabela 1 contém as informações referentes às datas de início e fim de cada um dos períodos com seus respectivos períodos médios.

* Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/R%C3%B8mer%27s_determination_of_the_speed_of_light>. Acesso em 10/08/2017.

[†] Id., 2012, p. 15.

[‡] Id., 1944, p. 30-31.

[§] Id., 2012, p. 15-34.

6. min. 12 34 42
15 h. 8 56 15.

obs. prim. Journalium
parisijs.

1668. Excl. A. Lebel.
Omnium J. H. Roemer
in Bnd. 16

Oct. 22 - 10 41 33 Immerho

1669.
no. 26 - 10 26 46 Imm

1671.
Martij 19 - 9 1 44 Emerho re
emuln

Apr. 27 - 7 42 30 Em.

Maij 4 - 9 41 30 Emer.

Oct. 24 - 18 15 0 Imm

Dec. 18 - 1672.

Jan. 3 - 12 42 36 Imm.

Jan. 10 - 14 32 14 Imm.

Jan. 12 - 8 59 22 Imm.

Feb. 11 - 10 57 6 Imm. dub.

Feb. 20 - 7 20 26 Imm. dub.

Mart. 7 - 7 58 25 Emer.

Mar. 14 - 9 52 30 Emer.

Mar. 23 - 6 18 14 Emer.

Mar. 28 - 13 45 30 Emer.

Mar. 30 - 8 14 46 Emer.

Apr. 6 - 10 11 22 Emer.

Apr. 13 - 12 8 8 Emer.

Apr. 22 - 8 34 28 Emer.

Apr. 29 - 20 30 6 Emer.

Nov. 28 - 5 37 5 Imm.

1673.
Feb. 4 - 17 31 10 Imm.

Feb. 6 - 12 0 0 Imm.

Feb. 13 - 13 53 20 Imm.

Feb. 27 - 17 40 10 Imm.

Mar. 1 - 12 9 1 Imm.

Mar. 15 - 16 0 48 Imm.

Mar. 17 - 20 28 16 Imm.

Mar. 24 - 12 24 30 Imm.

1673.
H. 1 11
Apr. 18 - 9 22 0 Emerho -

Apr. 25 - 11 18 5 Emer.

Maij 2 - 13 12 40 Emer.

Maij 11 - 9 17 39 Emer.

Maij 18 - 11 32 44 Emer.

Aug. 4 - 8 30 41 Emer.

Decem. 17 - 6 39 14 Imm.

Mai. 23 - 1674. H. 1 11
Junij 31 - 9 19 2 Emer.

1675.
H. 1 11
Jul. 20 - 8 22 42 Emer.

Julij 27 - 10 17 31 Emer.

Oct. 29 - 6 7 22 Emer.

1676.
H. 1 11
Maj 12 - 14 49 42 Imm.

Jun. 13 - 10 56 11 Imm.

Aug. 7 - 9 49 50 Emer.

Aug. 14 - 11 45 55 Emer.

Aug. 23 - 8 11 13 Emer.

Nov. 9 - 15 45 35 Em.

1677.
H. 1 11
Junij 9 - 12 23 24 Imm.

Junij 16 - 14 16 14 Imm.

Jul. 9 - 14 21 54 Imm.

Jul. 19 - 10 47 0 Emer. p. facie

Jul. 25 - 12 37 10 Imm.

Aug. 26 - 11 31 50 Emer.

Sept. 11 - 9 54 30 Emer.

Sept. 18 - 8 41 0 Contachy prim

8 46 0. Volus. Catell.

11 51 46 Emer.

Sept. 19 - 8 14 0 Contachy facies

8 18 30 Volus. Audierat

Nov. 5 - 6 59 0 Emer.

1678.
H. 1 11
Jan. 6 - 5 25 47 Emer.

Figura 8 – Manuscrito de Ole Roemer, contendo as datas referentes às observações dos eclipses de Io no disco de Júpiter dos anos de 1668 a 1678. Roemer dividiu seus dados em nove períodos, separando as imersões e emersões do satélite

Fonte: MEYER. (45)

Tabela 1 – Divisão dos dados de Roemer em nove intervalos de tempo, separados por imersões e emersões de Io no disco de Júpiter. Na penúltima coluna, encontra-se o período médio de Io, calculados por Kristensen e Pedersen

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

Fonte: Adaptada de KRISTENSEN; PEDERSEN. (41)

O método de Roemer consiste em analisar pequenas variações no período médio do satélite ao longo de cada um dos intervalos. Em 1693, após aplicar algumas correções, Cassini produziu suas tabelas usando o valor de 1d. 18h. 28m. 36s. para o período de 1660 até 1720*. Este valor bem com os períodos médios calculados da Tabela 1 nos sugerem que a precisão dos valores se encontra na casa dos minutos.

Estes períodos podem ser calculados através de uma regressão linear da data do eclipse pelo número de revoluções que o satélite realizou neste mesmo intervalo, ambas contado à partir do primeiro eclipse observado logo após a data de oposição[†] de Júpiter com a Terra, que neste caso equivale a $t_0 = 19/03/1671\ 9h.1m.44s.$ Uma vez que o número de revoluções do satélite corresponde a um número inteiro, podemos calculá-lo dividindo o

* Em 1668, Cassini utilizava o valor 1d.18h.27m.32,7s. para o período sinódico de Io.

[†] Oposição é momento em que a Terra se encontra em um ponto em sua órbita no qual ela está entre o Sol e o planeta considerado. Nesta situação a distância entre a Terra e o planeta é mínima possível.

intervalo de tempo decorrido desde a oposição pela parte mais precisa do valor do período de Io, isto é 1d.18h.28m. ($\sim 1,769$ d.)^{*}.

Para mostrar como o processo deve ser feito, vamos calcular o período médio de Io para o intervalo II da Tabela 1. Como as correções para a meia-noite em Paris serão as mesmas para todas as datas, podemos negligenciá-las para o cálculo do período. No entanto, como as medidas foram realizadas a partir de um relógio pendular, desenvolvido por Huygens em 1656 (46[†]), devemos considerar a correção no tempo solar médio,[‡] o que pode obtido através da aplicação da equação do tempo[§]. Utilizando as datas da Figura 8 e as correções da equação do tempo fornecidas por Kristensen e Pedersen, temos que a data de oposição t_0 corresponde a:

Data: 19/03/1671 9h. 1m. 44s.

Eq. do Tempo: + 7m. 51s.

19/03/1671 9h. 9m. 35s.

ou 2331457,88166 em dias julianos (JD) ^{**}.

Repetindo o procedimento para todas as datas contidas no intervalo II:

1. Data: 24/10/1671 18h. 15m. 00s.

Eq. do Tempo: - 15m. 41s.

2. Data: 03/01/1672 12h. 42m. 36s.

Eq. do Tempo: + 5m. 32s.

24/10/1671 17h. 59m. 19s.

2331677,24953 JD

03/01/1672 12h. 48m. 08s.

2331748,03343 JD

^{*} A amplitude do erro obtido no cálculo do número de revoluções considerando o período 1d.18h.28m. ($\sim 1,76944$ d.) ao invés de 1d.18h.28m.59s (1,77012d.) encontra-se na terceira casa decimal, pois $(1/1,76944) \sim 0,5651$ enquanto $(1/1,77012) \sim 0,5649$.

[†] Id., 1998, p. 564-565.

[‡] Um dia terrestre possui em média 23h. 56 min. 4s. Em nossas medidas de tempo diárias utilizamos o tempo solar médio, isto é, consideramos que um dia terrestre possui 24h. Para saber o tempo solar aparente, devemos considerar correções no tempo solar médio através da equação do tempo.

[§] A equação do tempo determina qual é o valor que deve ser adicionado no tempo solar médio para se obter o tempo solar aparente. Para o N-ésimo dia do ano (sendo o dia 1 de janeiro correspondente a N=1), temos que a correção no tempo solar médio é dada aproximadamente por $9,87.\text{sen}(2.B) - 7,53.\text{cos}(B) - 1,5.\text{sin}(B)$, com $B = 360^\circ(N-81)/365$. Para mais informações sobre a equação do tempo checar (47).

^{**} A data juliana consiste em um método de contar dias continuamente a partir de uma determinada data arbitrária, sem separação da data em horas, meses ou anos (contada à partir do meio dia do dia 01/01/4713 a.C. para o calendário juliano, ou 24/11/4714 a.C. no calendário gregoriano). Isso é pertinente pois quando desejamos conhecer o tempo decorrido entre duas datas, podemos efetuar uma subtração direta dos dias julianos sem recorrer a qualquer conversão de unidades. Pode-se encontrar uma calculadora online de conversão para dias julianos em: http://www.onlineconversion.com/julian_date.htm.

3. Data: 10/01/1672 14h. 32m. 14s.
Eq. do Tempo: + 8m. 34s.

10/01/1672 14h. 40m. 48s.
 2331755,11167 JD

5. Data: 11/02/1672 10h. 40m. 06s.
Eq. do Tempo: + 14m. 34s.

11/02/1672 11h. 11m. 40s.
 2331786,96644 JD

4. Data: 12/01/1672 08h. 59m. 22s.
Eq. do Tempo: + 9m. 16s.

03/01/1672 09h. 08m. 38s.
 2331756,881 JD

6. Data: 20/02/1672 07h. 20m. 26s.
Eq. do Tempo: + 14m. 16s.

20/02/1672 07h. 34m. 42s.
 2331795,81576 JD

Calculando o número de revoluções de Io a partir da data de oposição:

1. $(2331677,24953 - 2331457,88166)/1,769 = 219,368/1,769 \sim 124$
2. $(2331748,03343 - 2331457,88166)/1,769 = 290,152/1,769 \sim 164$
3. $(2331755,11167 - 2331457,88166)/1,769 = 297,23/1,769 \sim 168$
4. $(2331756,881 - 2331457,88166)/1,769 = 299/1,769 \sim 169$
5. $(2331786,96644 - 2331457,88166)/1,769 = 329,085/1,769 \sim 186$
6. $(2331795,81576 - 2331457,88166)/1,769 = 337,934/1,769 \sim 191$

O resultado dos cálculos estão condensados na Tabela 2. Usando os dados da mesma construímos o gráfico da Figura 9. O coeficiente angular dos pontos corresponde ao período médio desejado. Através de uma regressão linear, obtemos o coeficiente angular de $B = 1,76964d. \sim 1d.18h.28m.17s.$, exatamente como esperado. O coeficiente linear A desta reta corresponde ao período de oposição t_0 .

Tabela 2 – Relação entre as datas de observação dos eclipses e o número de revoluções de Io realizadas até a mesma, contado a partir da data de oposição (2331457,88166 dias julianos). As datas fornecidas correspondem ao tempo solar aparente das observações (em relação ao meio dia), em dias julianos.

Data da observação (JD)	Número de Revoluções de Io
2331677,24953	124
2331748,03343	164
2331755,11167	168
2331756,881	169
2331786,96644	186
2331795,81576	191

Fonte: Elaborada pelo autor.

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Ualue	Error
A	457,81356	0,00394
B	1,76964	2,33684E-5

Figura 9 – Gráfico da relação Tempo Solar Aparente das observações pelo Número de Revoluções de Io. Através de uma regressão linear, calculamos a reta que melhor se ajusta aos pontos. O coeficiente angular B do gráfico determina o período médio de Io entre as datas 24/10/1671- 20/02/1672, enquanto o coeficiente linear A corresponde à data de oposição dentro deste mesmo intervalo

Fonte: Elaborada pelo autor.

Roemer separou suas medidas de maneira que as imersões do satélite foram observadas quando o movimento da Terra em sua órbita é tal que estava se aproximando de Júpiter, enquanto as emergências foram observadas quando a Terra estava se afastando de Júpiter*. Os valores do período médio contidos na Tabela 1 mostram que não há precisão na faixa dos segundos para estas medidas. No entanto, existe uma consistência: o maior valor médio obtido para as imersões (1d.18h.28m.29s.) é menor que o menor valor calculado para as emergências (1d.18h.28m.37s.), o que sugeriu a Roemer a ideia de que a luz necessita de mais tempo para atravessar distâncias maiores.

Para seus cálculos, Roemer utilizou os dados coletados nos anos de 1671 à 1673 (intervalos de I a IV da Tabela 1), pois Júpiter passou pelo afélio[†] de sua órbita em 1672. Como o movimento de Júpiter varia muito pouco neste ponto de sua órbita, temos que o mesmo ocorrerá com o movimento de Io, de maneira que o período médio pode ser calculado por:

$$T_{Io} = \Delta T / n;$$

sendo ΔT é o intervalo de tempo para o qual deseja-se calcular a média, contado a partir da data de oposição, e n o número de revoluções realizados por Io em ΔT .

Nesta reconstrução, vamos utilizar o período médio de Io referente ao ano compreendido entre 1671 e 1672. Para isso, consideramos a primeira e a última medida dentro deste período de maneira que o intervalo de tempo decorrido entre elas corresponda a aproximadamente ao intervalo de tempo entre duas oposições sucessivas entre a Terra e Júpiter, que equivale a aproximadamente 399 dias. (41[‡]) São elas:

$$\begin{aligned} t_1 &= 19/03/1671 \text{ } 09h.01m.44s. + 7m.52s. \\ &\rightarrow 19/03/1671 \text{ } 09h.09m.36s. (2331457,88166 \text{ } JD); \\ t_2 &= 22/04/1672 \text{ } 08h.34m.28s. - 1m.58s. \\ &\rightarrow 29/04/1672 \text{ } 08h.32m.30s. (2331857,8559 \text{ } JD), \end{aligned}$$

onde a correção da equação do tempo já foi aplicada.

* Ver Figura 7 e explicações na Seção 3.2.

[†] Ponto da órbita de um planeta em que ele se encontra mais afastado do Sol. Neste ponto Júpiter permanecerá praticamente imóvel quando observado da Terra.

[‡] Id., 2012, p. 24-25.

Como Io executa $n = 226$ revoluções no intervalo de tempo escolhido, temos que o período médio buscado corresponde a:

$$T_{Io} = \Delta T/n = (t_2 - t_1)/n = 399,974/226 = 1,7697964 \sim 1d.18h.28m.30s.$$

Consideremos agora o primeiro grupo de imersões dentro do ano considerado, que corresponde ao intervalo II da Figura 8. Como as medidas referentes aos dias 11 e 20 de fevereiro estão marcadas como duvidosas, nesta análise vamos tomar o eclipse de 12 de janeiro como o último deste período de imersões. Dessa forma, o tempo solar aparente t_A do primeiro eclipse deste intervalo é:

$$\begin{aligned} t_A &= 24/10/1671 \ 18h.15m.00s. - 15m.41s. \\ &= 24/10/1671 \ 17h.59m.19s. (2331677,24953 \ JD). \end{aligned}$$

Enquanto que para o dia 12 de janeiro de 1672:

$$\begin{aligned} t_B &= 12/01/1672 \ 08h.59m.22s. + 09m.23s. \\ &= 12/01/1672 \ 09h.08m.45s. (2331756,88108 \ JD). \end{aligned}$$

Calculando o intervalo de tempo decorrido entre estes dois eclipses temos:

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

Essa diferença de tempo foi obtida diretamente através das observações de Io. No entanto, este valor poderia ser previamente estimado a partir do período médio T_{Io} calculado anteriormente. Para isso, deve-se conhecer o número de revoluções que o satélite realizou entre os dois eclipses considerados:

$$n = \Delta T_1 / 1,769 = 79,632 / 1,769 = 45,0152 \sim 45.$$

Dessa forma a diferença de tempo entre os dois eclipses também pode ser calculada por:

$$\Delta T_2 = 45.T = 45.(1d.18h.28m.30s.) = 79d.15h.22m.30s.$$

Vale notar que o cálculo de ΔT_2 leva em consideração a hipótese de que a luz se propaga com velocidade infinita, pois estamos considerando que o intervalo de tempo entre dois eclipses sucessivos será sempre constante, independente do movimento relativo entre a Terra e Júpiter.

A partir dos valores calculados, observamos que ΔT_2 é maior que ΔT_1 , de maneira que $\Delta T_2 - \Delta T_1 = 12m.25s$. Como vimos, Roemer atribuiu esta diferença à hipótese de que a luz necessita de tempo para percorrer a distância Terra-Júpiter. Esta distância 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. Assim, determinando a variação da distância Terra-Júpiter neste intervalo, podemos calcular a velocidade da luz segundo a hipótese de Roemer.

Figura 10 – Modelo para cálculo da distância Terra-Júpiter quando a Terra se encontra em diferentes pontos de sua órbita. Na figura, a circunferência centrada em S representa a trajetória da Terra ao redor do Sol e Júpiter no ponto J, que nesta situação podemos considerar imóvel em relação a Terra. O ponto O corresponde à posição da Terra quando esta se encontra em oposição com Júpiter, enquanto as retas $\overline{AJ}$ e $\overline{BJ}$ correspondem à distância entre a Terra e Júpiter em dois pontos distintos da trajetória terrestre.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Consideremos um modelo simplificado onde a Terra descreve uma órbita circular ao redor do Sol como na Figura 10. Nesta, consideramos Júpiter no ponto J em repouso em relação a Terra*. As semi-retas determinadas por $\overline{AJ}$ e $\overline{BJ}$ representam a distância entre a Terra e Júpiter em dois pontos diferentes da órbita terrestre. Supondo que um eclipse de Io tenham sido observado quando a Terra se encontra no ponto A e o outro quando esta se encontra em B, de maneira que $\angle ASJ = \theta_1$ e $\angle BSJ = \theta_2$. A variação da distância entre a Terra e Júpiter neste intervalo de tempo equivale a $d = \overline{BJ} - \overline{AJ}$. Sendo R_T e R_J os raios das órbitas da Terra e de Júpiter ao redor do Sol respectivamente, podemos obter $\overline{AJ}$ e $\overline{BJ}$ utilizando lei dos cossenos:

$$\overline{AJ}^2 = R_T^2 + R_J^2 - \sqrt{2 \cdot R_T \cdot R_J \cdot \cos \theta_1},$$

* O que corresponde a uma boa aproximação, pois entre 1671 e 1672 Júpiter se encontra no afélio de sua órbita.

$$\overline{BJ}^2 = R_T^2 + R_J^2 - \sqrt{2 \cdot R_T \cdot R_J \cdot \cos \theta_2}.$$

Usando a Terceira Lei de Kepler, podemos relacionar R_T e R_J com os períodos orbitais T_T da Terra e T_J de Júpiter:

$$(R_J/R_T)^3 = (T_J/T_T)^2 \Rightarrow R_J = \alpha \cdot R_T, \text{ com } \alpha = \sqrt[3]{(T_J/T_T)^2}.$$

Como $T_J \sim 11,86 \cdot T_T$ temos $\alpha \sim 5,20$. Com isso é possível determinar a diferença $\overline{AJ}$ e $\overline{BJ}$ em termos de R_T , θ_1 e θ_2 :

$$\overline{AJ} = R_T \sqrt{1 + \alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \cos \theta_1} = K_1 \cdot R_T, \text{ com } K_1 = \sqrt{1 + \alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \cos \theta_1};$$

$$\overline{BJ} = R_T \sqrt{1 + \alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \cos \theta_2} = K_2 \cdot R_T, \text{ com } K_2 = \sqrt{1 + \alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \cos \theta_2}.$$

Para calcular θ_1 e θ_2 , basta determinar o tempo decorrido desde a oposição até a data do eclipse*. Usando as datas dos dois eclipses considerados anteriormente, isto é, t_A e t_B , juntamente com a data de oposição t_0 , temos†:

$$\theta_1 = (t_A - t_0) \cdot 360^\circ / 365 = 219,368 \cdot 360^\circ / 365 = 216,263^\circ;$$

$$\theta_2 = (t_B - t_0) \cdot 360^\circ / 365 = 299 \cdot 360^\circ / 365 = 294,904^\circ.$$

Calculando K_1 e K_2 com os valores obtidos encontramos:

$$K_1 \sim 6,0344 \text{ e } K_2 \sim 4,8642,$$

de maneira que $\overline{AJ} > \overline{BJ}$, o que está de acordo com as observações, pois no intervalo considerado distância Terra-Júpiter diminui. Calculando a distância ΔD em que a Terra se aproxima de Júpiter no período considerado obtemos:

$$d = |\overline{AJ} - \overline{BJ}| = (K_1 - K_2) \cdot R_T \sim (6,0344 - 4,8642) \cdot R_T \sim 1,17 \cdot R_T.$$

Segundo a hipótese de Roemer, a luz deve percorrer esta distância em $12m.25s. \sim 12,42m.$, de forma que o intervalo de tempo necessário para a luz atravessar o raio da órbita terrestre R_T é dado por:

$$R_T \cdot (12,42 / 1,17 \cdot R_T) = 12,42 / 1,17 \sim 10.61 \text{ min},$$

ou aproximadamente os 11 minutos previstos por Roemer*.

* Em 365 dias a Terra varre um ângulo de 360° .

† Usamos as datas com as correções da equação do tempo.

É importante ressaltar que não é possível conhecer exatamente como Roemer efetuou seus cálculos. O seu manuscrito encontrado por Meyer contém dados referentes a observações realizadas após 1676, o que indica que este manuscrito não necessariamente foi aquele utilizado por Roemer para produzir seu anúncio dos 11 minutos para a *Académie de Sciences de Paris*. A publicação referente as observações de Roemer em 1676 contém quase toda a informação de forma qualitativa, sem muitos detalhes sobre suas medidas ou o período sinódico de Io utilizado[†], apenas mencionando que a luz demora cerca de 11 minutos para cruzar o raio da órbita terrestre, sem explicar como este valor foi obtido a partir de seus dados. (44)

As ideias de Roemer foram muito bem aceitas por Christian Huygens, que desenvolveu seu modelo óptico em paralelo às observações dos eclipses. A finitude da velocidade da luz é a hipótese fundamental no trabalho de Huygens, fazendo com que as ideias de Roemer fossem incorporadas no primeiro capítulo de seu livro *Tratado sobre a Luz*, no qual Huygens calcula a velocidade da luz à partir dos 11 minutos de Roemer.

Antes de entrarmos efetivamente no mérito da aceitação das ideias de Roemer na época de sua publicação, vamos apresentar um pouco do modelo óptico de Huygens para compreender o papel que a questão da velocidade da luz desempenhou em suas ideias.

3.4 O modelo óptico de Christiaan Huygens e a velocidade da luz

Christiaan Huygens (1629-1695) foi membro da *Académie de Sciences de Paris* de 1666 até 1681. Tem contribuições muito importantes em diversas áreas como matemática, mecânica, astronomia e óptica. (48[‡]) A óptica de Huygens foi fortemente influenciada pelos pensamentos de Descartes tanto pela abordagem metodológica quanto pela concepção mecanicista. Com relação à primeira, Huygens defende que:

“Aqui serão vistas demonstrações de tipos que não produzem tanta certeza quando as da Geometria, e que mesmo diferem muito delas, pois enquanto os geômetras provam suas proposições por princípios certos e incontestáveis, aqui os princípios são verificados pelas conclusões que deles se tiram; a natureza das coisas não permite que isso seja feito de outra forma. É possível, no entanto, chegar assim a

* Para esse mesmo conjunto de dados, Meyer estima o valor de 10,74m. Isso se deve à uma diferença de 4 segundos na correção da equação do tempo no eclipse de 24/10/1671 (12, 45).

[†] Em seu trabalho, Roemer apenas menciona que o período de Io corresponde a um valor em torno de 42,5 horas. Contudo, como visto na análise apresentada, é necessária uma precisão da ordem de minutos no período para que seja possível a obtenção dos valores descritos no artigo.

[‡] Id., 1981, p. 597-613.

um grau de verossimilhança que frequentemente nada fica devendo à evidência total. Tal ocorre quando as coisas demonstradas a partir desses princípios assumidos correspondem perfeitamente aos fenômenos que foram observados pela experiência [...]. Se todas essas provas de verossimilhança forem encontradas naquilo que me propus a tratar, como me parece que se encontram, isso deve ser uma grande confirmação do sucesso de minha pesquisa e dificilmente poderia ocorrer que as coisas não fossem aproximadamente como as represento.” (30)

Além disso, seu modelo para a luz também possui forte caráter mecanicista:

“Não se pode duvidar que a luz consistia no movimento de certa matéria. Se considerarmos a sua produção, encontraremos que na Terra são principalmente o fogo e a chama que a geram e eles contêm sem dúvida corpos que têm um movimento muito rápido[...]. Se considerarmos seus efeitos, veremos que, quando a luz é concentrada, como por espelhos côncavos, ela tem a virtude de queimar como o fogo, ou seja, ela separa as partes dos corpos. Isso certamente é um sinal de movimento, pelo menos na verdadeira Filosofia, na qual se concebe a causa de todos os efeitos naturais por razões da Mecânica – e isso deve ser feito, a menos que se renuncie a toda esperança de jamais compreender coisa alguma na Física, em minha opinião.” (30)*

Embora haja traços do pensamento cartesiano na obra de Huygens, seu modelo para a luz se afasta completamente do modelo de Descartes. Em sua teoria, Huygens considera que a luz são perturbações não periódicas que se propagam na matéria etérea que preenche os espaços entre as partículas dos corpos transparentes, analogamente à propagação do som no ar:

“[...]quando se considera a extrema velocidade com que a luz se espalha por todos os lados e que, quando vem de diferentes lugares, mesmo totalmente opostos, [os raios luminosos] se atravessam uns aos outros sem se atrapalharem, compreende-se que, quando vemos um objeto luminoso, isso não poderia ocorrer pelo transporte de uma matéria que venha do objeto até nós, como uma flecha ou bala atravessa o ar; pois certamente isso repugna bastante a essas duas propriedades da luz e principalmente a última. Ela se espalha portanto de uma outra maneira e o que nos pode conduzir a compreendê-la é nosso conhecimento da propagação do som no ar.” (30†)

Este modelo permitiu Huygens concluir que a luz se propaga mais lentamente em meios mais densos, uma vez que estes possuem mais partículas etéreas, exigindo que a luz realize mais desvios para atravessá-lo. Neste ponto, a interpretação de Huygens se opõe àquela sugerida por Descartes, pois como já apresentado anteriormente, seu modelo supõe que a luz deve ser transmitida mais facilmente em um meio mais denso do que por um menos denso.

Huygens explicita que embora o tratamento da luz seja feito em analogia ao som, os seus meios de propagação são de natureza distintas. Para justificar essa afirmação, Huygens se apoia em um experimento de Robert Boyle (1627-1691) com tubos sonoros, que consiste em isolar um corpo sonoro através de um recipiente de vidro. Ao se retirar o ar do recipiente e

* Id., 1986, p. 12.

† Id., 1986, p. 12.

tomando-se o cuidado de envolver o corpo sonoro com algum material não elástico (Huygens sugere algodão ou penas) para que as vibrações produzidas não atinjam a superfície do vidro, nota-se que nenhum som será ouvido. Huygens argumenta que o mesmo não irá acontecer para um corpo luminoso, pois a luz emanada continuará atravessando o recipiente ainda que o ar de dentro do mesmo tenha sido retirado.

Sendo estes meios de naturezas distintas, eles provavelmente se diferenciam em suas propriedades fundamentais. Então apesar de Huygens ter considerado que a propagação da luz se dá através da colisão de partículas que constituem o meio etéreo, da mesma forma como ocorre com o som no ar, ele sugere que estas colisões devem ocorrer de maneiras diferentes para cada caso. Segundo Huygens, essa é a razão pela qual a luz se propaga com velocidade muito maior que a do som. (30*)

Para demonstrar que a luz se propaga com velocidade muito maior que a do som, no primeiro capítulo de seu *Tratado Sobre a Luz*, Huygens recorre às ideias de Roemer sobre as observações de Júpiter, e atribuindo um valor para o diâmetro da órbita terrestre, estima um valor para a velocidade da luz:

“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 KL [Figura 7] fosse apenas 22 mil desses diâmetros. Sendo percorridos em 22 minutos, isso corresponde a mil diâmetros por minuto, e 16 ⅔ diâmetros 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 [...].” (30†)

Uma vez que cada légua corresponde a 3 milhas e 1 milha equivale a aproximadamente 1,6 km, temos que o diâmetro da Terra proposto por Huygens corresponde a $2865.3.1,6 = 13752 \text{ km}$. Dessa forma, como ele supõe que das observações de Roemer que a distância percorrida pela luz deve corresponder à 22 mil diâmetros terrestres, temos que o valor da velocidade da luz estimado por ele deve corresponder a:

$$c = 22000.13752/22 = 13752000 \text{ km/min} = 229200 \text{ km/s}.$$

Se considerarmos ainda a velocidade do som mencionada por Huygens, encontramos um valor de aproximadamente

$$v_{\text{som}} = (180/2282).3.1,6/1 \sim 0,38 \text{ km/s},$$

* Id., 1986, p. 17-18.

† Id., 1986, p.16.

o que está em concordância com a comparação de que a velocidade da luz é cerca de seiscentas mil vezes maior que a velocidade do som, fechando assim a consistência de seu cálculo.

Tendo fundamentado sua hipótese, Huygens pode agora desenvolver seu modelo óptico e assim derivar muitos resultados já estudados anteriormente neste trabalho. A seguir apresentamos um pouco destes resultados a partir da fundamentação e aplicação de seu modelo.

3.4.1 A propagação da luz no modelo de Huygens e sua aplicação nos fenômenos de reflexão e refração

Huygens supunha que a propagação da luz se dá através de ondas esféricas. Esta hipótese é uma consequência da construção das colisões que ocorrem no meio etéreo: quando uma esfera maciça colide com uma fila de outras esferas que se tocam, vemos que o movimento é transmitido da primeira esfera para a última esfera da fila, sem que as outras se movam. Huygens argumentou que a propagação da luz no meio etéreo deve ocorrer da mesma forma, pois essa transmissão não é instantânea, de maneira que o movimento deve atravessar esfera por esfera até a última da fila (Figura 11). Ele ainda estabelece que essas colisões devem ocorrer de forma elástica, independente de serem fortes ou fracas, de modo que a transmissão da luz se dê sempre com velocidade constante.

Figura 11 – Ilustração utilizada por Christiaan Huygens para explicar a transmissão da luz no éter. Nessa, ele assume que uma esfera maciça A irá colidir com a esfera B que se encontra em contato com outras esferas C. Após a colisão, todo o movimento será transmitido para as esferas C, de maneira que as esferas A e B fiquem paradas.

Assumindo que as partículas no éter não se encontram alinhadas, mas sim espalhadas aleatoriamente pelo meio, as colisões devem ocorrer em todas as direções. Huygens argumenta que isso pode atrapalhar a transmissão da luz. Ele supõe que uma esfera maciça A irá colidir com outra esfera maciça B que se encontra em contato com outras três esferas C. Ao colidir com B, a esfera A transmite seu movimento para a esfera B que consequentemente transfere o movimento às esferas C, de maneira que no fim do processo A e B permanecerão paradas enquanto as esferas C estarão em movimento.

Generalizando essa ideia para um meio completamente preenchido, Huygens concluiu que a propagação ocorrerá simetricamente em todas as direções, isto é, de maneira esférica. A sucessividade da propagação é estabelecida pela hipótese de que um corpo luminoso deve emanar continuamente ondas esféricas de todos os pontos de sua superfície, como ilustrado pela Figura 12 a. Sendo A, B e C três pontos distintos na chama de uma vela, temos que todos os círculos concêntricos a esses pontos devem representar ondas esféricas provenientes desses pontos. (30*)

Figura 12 – Na figura a ilustra a propagação sucessiva das ondas esféricas no modelo de Huygens. Cada um dos pontos A, B e C, representados na chama de uma vela, emite continuamente ondas esféricas que são representadas por círculos concêntricos em torno destes pontos. Esta propriedade se aplica a todos os pontos da superfície da chama. Já a figura b ilustra o funcionamento do princípio de superposição de ondas esféricas de Huygens. Nessa imagem, o ponto A representa uma fonte luminosa, que tem como frente de sua onda esférica o arco DCF. Todos os outros pontos também produzem suas próprias ondas esféricas, que irão todas tangenciar a frente esférica DCF

Fonte: HUYGENS. (30)

* Id., 1986, p. 18-21.

Cada partícula quando atingida por uma onda esférica comunica seu movimento à todas as partículas vizinhas que estão em contato com ela. Dessa forma, se na Figura 12 b. o ponto luminoso A emana a onda esférica DCF, uma partícula que se encontra em B dentro da esfera DCF irá emanar uma onda esférica particular KCL, que encontrará DCF no ponto C no mesmo instante que onda transmitida do ponto A atingir DCF. O mesmo irá ocorrer com todas as outras partículas que se encontram nos pontos b e d. Contudo, as contribuições das ondas esféricas destes pontos é irrisória quando comparada a onda esférica DCF, pois esta equivale a uma composição das ondas transmitidas por todos os outros pontos.

Além disso, podemos notar que cada onda deve se propagar de maneira que suas extremidades estejam sempre em uma mesma linha reta traçadas do ponto luminoso A. Dessa forma, a onda BG se propaga através do arco CE, limitado pelas retas ABC e AGE. Todas as contribuições em outras direções somente irão limitar o movimento dentro da circunferência CE, pois todas estas terão CE como mesma circunferência tangente. Isso justifica porque os feixes luminosos se propagam em linhas retas. (30*)

Para avaliar melhor a pertinência do modelo de Huygens, vamos estudar a aplicação de seu modelo nas derivações as leis de reflexão e refração da luz, exatamente como fizemos com Descartes. Na Figura 13 a, temos que AC representa a frente de onda proveniente de uma fonte luminosa distante, que incide obliquamente no plano refletor AB, com ângulo de incidência $i = \angle ABC$. A onda esférica irá se propagar continuamente pelo plano AB, de maneira que os pontos H da onda AC irão produzir outras ondas esféricas particulares ao longo de cada caminho HK, que liga a frente da onda incidente com o plano AB. Uma vez que o plano AB limita o movimento para baixo, as ondas particulares produzidas ao longo de AB irão produzir a frente de onda refletida SNR, as quais possuem a reta BN como tangente comum. Dessa forma, BN deve representar a frente de onda refletida. Para analisar a transição de AC para BN, basta traçar as retas KO paralelas a BN e as retas KL paralelas a AC, de modo que $AC = KO + KL$. Assim, ângulo de reflexão *requivale* ao ângulo NAB. Como os triângulos ACB e BNA são retângulos de lados AB comum e com $CB = NA$, temos então a lei da reflexão:

$$\text{sen } i = \text{sen } r \Rightarrow i = r.$$

O caso geral da refração pode ser estudado pela Figura 13 b, na qual AC é a frente de onda de um feixe de luz DA que incide obliquamente sobre a interface AB entre um meio menos denso e um meio mais denso. Se a velocidade de propagação no meio menos denso é v_i o

* Id., 1986, p. 22-23.

tempo t necessário para a frente de onda percorrer a distância CB corresponde a $t = CB/v_i$. A velocidade no meio mais denso é $v_r > v_i$, de maneira que $v_i/v_r = n$, com $n > 0$. Assim, em analogia ao caso anterior, se SNR corresponde a frente de onda refratada, temos que seu raio corresponderá a $NA = v_r \cdot t = v_r \cdot (CB/v_i) = CB/n$.

Figura 13 – Ilustrações utilizadas por Huygens para explicar o fenômeno de óptico de reflexão e refração. Na figura a, AC corresponde a frente de onda incidente em um plano BA, gerando a onda refletida de frente de onda BN. Aqui, os ângulos de incidência e reflexão equivalem aos ângulos CBA e NAB respectivamente. Já na figura b temos que AC corresponde à frente de onda incidente para um meio mais denso, separados pela interface AB, produzindo uma frente de onda refratada AN. Os ângulos de incidência e refração correspondem respectivamente a EAD e FAN

Fonte: HUYGENS. (30)

Como na reflexão, podemos representar a passagem da frente de onda CA para a frente de onda BN traçando as retas LK paralelas a AC e OK paralelas a BN. Pela simetrias dos triângulos, o ângulo de incidência EAD é igual ao ângulo CAB, enquanto o ângulo de refração FAN equivale ao ângulo NBA. Logo:

$$\sin i / \sin r = (CB/AB)/(AN/AB) = CB/AN = (v_i t)/(v_r/t) = v_i/v_r = n,$$

que corresponde a lei dos senos da refração. É interessante notar também que o modelo de Huygens corrigiu o problema das velocidades invertidas de Descartes.

Em seu *Tratado sobre a Luz*, Huygens ainda discute detalhadamente os casos de refração no ar e em cristais. Apesar da consistência de seu trabalho, suas ideias não foram imediatamente aceitas devido ao fato de se fundamentarem na hipótese de propagação sucessiva da luz, a qual ainda não era muito bem aceita. Neste período, a óptica de Descartes era frequentemente adotada, não haviam experimentos para medir a velocidade da luz de

forma conclusiva e as explicações de Roemer para as diferenças nos períodos dos satélites de Júpiter também não foram admitidas de forma unânime.

Nesta seção, apresentamos como a finitude da velocidade da luz é a hipótese fundamental da óptica de Huygens, o qual calculou a velocidade da luz levando em conta que esta necessita de 11 minutos para atravessar o raio da órbita terrestre, valor estimado por Roemer. Agora que possuímos uma visão mais detalhada sobre os possíveis cálculos de Roemer bem como o modelo óptico de Huygens, podemos analisar criticamente diversas questões envolvendo a repercussão das ideias de Roemer.

3.5 O processo de aceitação das ideias de Roemer

Com exceção de Huygens e Picard, as ideias de Roemer não foram imediatamente aceitas por seus contemporâneos na França, principalmente por Cassini e sua família. Grande parte das efemérides das luas de Júpiter consideradas confiáveis foram públicas por Cassini em 1668, que passaram a ser utilizadas como referência por diversos astrônomos. A fama de suas tabelas, bem como suas habilidades como astrônomo, o levaram a ter uma carreira na *Académie de Sciences de Paris*, tornando-se diretor da mesma no ano de 1671. (41*)

Cassini já havia observado as irregularidades no período de Io, o que pode ser verificado em seu manuscrito datado de 22 de agosto de 1676. (37[†]) No entanto Cassini não acreditava no movimento sucessivo da luz, sugerindo que as irregularidades poderiam estar relacionadas com a ainda desconhecida excentricidade da órbita dos satélites:

“A Academia ainda notou que na sequência dessas observações que o tempo para um considerável número de imersões de um mesmo satélite é apreciavelmente menor que para o mesmo número de emergências, algo que pode ser explicado pela hipótese do movimento subsequente da luz: mas isto não era o suficiente para convencer a Academia que o movimento da luz é de fato sequencial, porque não se pode ter certeza que essa desigualdade no tempo não é produzida pela excentricidade [na órbita do] satélite, ou por outras irregularidades em seu movimento, ou por outra causa ainda não entendida, que pode tornar-se clara no futuro.” (49[‡])

Com isso Cassini contestou as ideias de Roemer, argumentando que a mesma irregularidade no período de Io não era observada nos demais satélites de Júpiter[§], fortalecendo assim suas ideias referentes a excentricidade das órbitas:

* Id., 2012, p. 12-14.

† Id., 2008, p. 99.

‡ Id., 1693a, p. 47.

§ Isso só ocorre porque o movimento destes satélites são afetados por suas perturbações mútuas, conhecidas atualmente pelo nome de libração. Esse fato ficou desconhecido até os trabalhos de Laplace 1784 (12).

“Quando construí minhas primeiras tabelas, o movimento do quarto satélite me pareceu mais uniforme do que todos os outros, e o primeiro satélite pareceu aproximar da uniformidade do quarto. Notei que no segundo e no terceiro havia desigualdades mais importantes, e eu confesso que nas efemérides eu usei algumas equações empíricas as quais deduzi das observações, cujas causas ainda não descobri. O Senhor Romer explicou de maneira muito engenhosa uma dessas desigualdades que ele observou por muitos anos no primeiro satélite pelo movimento subsequente da luz, a qual necessita de mais tempo para vir de Júpiter até a Terra quando está mais distante deste do que quando está mais próxima; mas ele não examinou se essa hipótese poderia servir para os outros satélites, os quais precisariam da mesma desigualdade de tempo.” (50)*

De fato, as críticas de Cassini são consistentes, pois se as diferenças nos períodos de Io forem devido à velocidade finita da luz o mesmo efeito deveria ser observado nos outros satélites. Como isso não acontecia, Cassini preferiu buscar hipóteses alternativas. Além disso, ele já havia se mostrado muito cauteloso em outros momentos. Em 1671 Cassini constatou um deslocamento da estrela Polaris em relação ao Polo Norte Celeste, que de fato existia, embora ele e Picard não conseguissem justificar a irregularidade. Em virtude disso Cassini não se mostrou confiante com esta constatação, uma vez que suas medidas contrariavam as de Tycho Brahe, que eram consideradas muito precisas. (37[†])

É importante ressaltar que Cassini não descartava a justificativa utilizada por Roemer, mas discordava de sua atribuição conclusiva para explicar as oscilações no período de Io. Cassini havia levantado uma série de outras possíveis hipóteses para explicar as irregularidades, envolvendo a excentricidade da órbita dos satélites e até mesmo variações no diâmetro de Júpiter. Além disso, Cassini e Picard concordaram com a publicação do artigo de Roemer, deixando que o mesmo se responsabilizasse por suas ideias. (37[‡], 41[§])

Roemer nunca contestou os argumentos de Cassini publicamente, contudo, em uma carta datada de 30 de setembro de 1677 para Huygens, Roemer lista um conjunto de quatro motivos pelos quais a irregularidade no período de Io não pode advir de nenhuma outra causa senão da velocidade finita da luz:

“Os obstáculos que impedem que os três satélites exteriores possam ser utilizados na pesquisa sobre o movimento da luz estão relacionados a quatro tópicos:
I. As imersões e emersões são mais raras.
II. Os momentos de entrada na sombra são menos nítidos e mais lentos por seus movimentos, e muitos deles incidem obliquamente na borda da sombra.
III. Suas inclinações e nodos não são tão bem conhecidos, havendo discrepâncias observadas de vários minutos quanto à sua incidência oblíqua na sombra.

* Id., 1693b, p. 391.

† Id., 2008, p. 100.

‡ Id., 2008, p. 100-101.

§ Id., 2012, p. 12-14.

*IV. Devemos confessar que estes possuem irregularidades que não foram determinadas, ou pela excentricidade ou por qualquer outra causa, que fazem com que as observações entrem em conflito com a teoria do Sr. Cassini por um espaço de tempo duas ou três vezes maior do que aquele que procuramos e que determinamos pelo primeiro satélite.
Destes, os [problemas] que são mais notáveis são o terceiro e quarto." (51*)*

Huygens ficou convencido com os argumentos de Roemer, tanto que no primeiro capítulo de seu *Tratado sobre a Luz* publicado em 1679, explica detalhadamente as ideias de Roemer e as utiliza para calcular a velocidade da luz[†].

É necessário chamar atenção ao fato de que em sua carta para Huygens, Roemer apenas explica as dificuldades experimentais que possivelmente impediram que suas análises das observações de Io pudessem ser aplicadas nas observações dos eclipses de Europa, Ganimedes e Calisto. Em seus dois primeiros pontos, Roemer destaca elementos de natureza técnica, que não dizem muito respeito ao fenômeno físico em si, mas sim às dificuldades de se observar estes fenômenos. Seu terceiro argumento contribui para a aceitação das dificuldades de se observar o fenômeno nos demais satélites, mas ainda não estabelece efetivamente se ele pode ou não ser observado. Finalmente em seu quarto argumento, Roemer assumiu a ideia de que pouco se conhecia sobre o movimento dos satélites em questão, explicando que os erros nas observações devidos às irregularidades desconhecidas eram muito superiores às aquelas encontradas nas observações de Io. No entanto, esse último ponto na verdade adiciona credibilidade à cautela de Cassini, que preferiu não inferir sobre a irregularidade dos períodos de Io enquanto não tivesse mais segurança daquilo que estava medindo.

A lista de argumentos de Roemer definitivamente não é suficiente para se ignorar a precaução de Cassini com suas observações, como aparentemente foi para Huygens. No entanto deve-se chamar atenção ao fato de que o modelo de Huygens depende diretamente da hipótese de que a luz se propaga com uma velocidade finita e muito maior que a do som, como já discutido na seção 3.4. E levando em conta que Huygens já havia assumido esta hipótese três anos antes da publicação dos resultados de Roemer (16[‡]), podemos inferir que estes foram convenientes para fortalecer seu modelo ótico, e é possivelmente por essa mesma razão que as explicações contidas na carta de 1677 foram tão facilmente aceitas por ele.

É importante ressaltar que no artigo publicado pela *Académie*, Roemer não apresentou claramente como ele estimou o valor de 11 minutos para a luz atravessar o raio da órbita terrestre. (44) Outras informações fundamentais para sua hipótese também não foram

* Id., 1676-1684, p. 32-33.

† Ver seção 3.3 deste trabalho.

‡ Id., 1967, p. 202-203.

reveladas, como o número de órbitas realizadas pelo satélite para o cálculo do período médio de Io nos momentos em que a Terra se aproximava ou afastava de Júpiter. Além disso, as diferenças nos períodos de Io calculados através de imersões e emersões só poderiam ser observadas com uma precisão de segundos, fato que também foi deixado de lado por Roemer quando apresentou o período médio de Io como 42,5 horas no artigo publicado pela *Académie*.

Podemos também considerar o fato de que as medidas de Roemer não eram tão confiáveis, como podemos observar no manuscrito da Figura 11, onde várias observações estão marcadas como duvidosas e muitas outras estão ilegíveis. Ademais, Shea (46^{*}) aponta uma série de argumentos de como as medidas de Roemer possuem uma forte inconsistência interna com suas hipóteses, adicionando considerável desconfiança em todo o seu conjunto de observações. Devido a essa falta de precisão, o autor sugere que este pode ser o motivo pelo qual Roemer nunca efetivamente publicou um valor numérico para a velocidade da luz.

Apesar disso, as ideias de Roemer se tornaram conhecidas na Inglaterra e em outros lugares. O astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1742) era muito próximo de Cassini e também se interessava pelos eclipses das luas de Júpiter. Em 1694 publicou uma adaptação das tabelas de Cassini para as efemérides dos quatro satélites. Tentando verificar a hipótese da propagação finita da luz, Halley estudou diversas observações dos eclipses, demonstrando que as desigualdades eram compatíveis com a hipótese da finitude da velocidade da luz. Além disso, encontrou diversos erros nas tabelas de Cassini e, apesar de seu respeito pelo trabalho de Cassini, Halley criticou fortemente sua teimosia em não aceitar as ideias de Roemer. Em suas verificações, Halley também constatou que o valor correto para a luz atravessar o raio da órbita terrestre deve corresponder a um valor aproximado de 8,5 minutos. (37[†])

As hipóteses de Roemer começaram a ser mais amplamente aceitas em 1728 com os estudos independentes sobre a aberração da luz, pelo astrônomo inglês James Bradley (1693-1762). Bradley observou a ocorrência de uma pequena variação anual na órbita elíptica de todas as estrelas. Ele explicou o fenômeno através da combinação dos movimentos da Terra e da luz: se a luz se propaga instantaneamente, nada de estranho deve ocorrer quando observarmos um objeto em movimento. (52[‡]) Contudo, se a luz se propaga com velocidade

^{*} Id., 1998, p. 565-568.

[†] Id., 2008, p. 101-102.

[‡] Id., 1981, p. 387-388.

finita, o objeto aparenta ter sua posição ligeiramente alterada quando vista por um observador em movimento. Isso ocorre devido ao desvio angular referente ao tempo necessário para a luz atingir os olhos do observador em diferentes posições da trajetória. A descoberta de Bradley confirmou simultaneamente tanto a finitude da velocidade da luz quanto a revolução da Terra em torno do Sol.

Utilizando seus resultados para a aberração da luz, Bradley ainda calculou que o tempo necessário para luz atravessar o raio da órbita terrestre corresponde a 8 m. 12s, valor bem próximo daquele obtido por Halley, e mais próximo daquele aceito atualmente. (12*) Os trabalhos de Bradley tiveram forte influência para a aceitação das ideias de propagação sucessiva da luz, de maneira que até a família Cassini ficou convencida.

Até aqui, vimos que existem diversas maneiras de se interpretar um mesmo fenômeno físico, e que há muitas questões a serem consideradas em cada um dos pontos de vista. O objetivo da próxima seção consiste em explorar diversos elementos deste episódio histórico sob um ponto de vista didático, visando reconhecer diversos elementos da natureza da ciência presentes no mesmo. Para isso, desenvolvemos uma atividade didática para ser aplicada na formação de futuros professores de ciências.

* Id., 1944, p. 37.

4 A História da Ciência no ensino de ciências

4.1 Porque usar História da Ciência no ensino de Ciências? Uma breve discussão sobre a Natureza da Ciência

Vejamos alguns trechos dos dois primeiros verbetes encontrados quando se procura por ‘velocidade da luz’ no Google:

Verbete 1:

*“Desde a antiguidade clássica, vários filósofos especularam sobre a velocidade da luz. Empédocles, Aristóteles e Heron na Grécia e os árabes Avicena e Alhazen deixaram, também, suas opiniões. [...] Johannes Kepler, Francis Bacon e René Descartes, na Europa, também citaram o assunto. Galileu Galilei propôs um experimento em 1638, realizado em Florença no ano de 1667, que fracassou. A primeira técnica de medição foi acidentalmente descoberta em 7 de dezembro de 1676 pelo astrônomo dinamarquês Ole Romer. Enquanto observava Júpiter e seu satélite Io, notou que havia um atraso, o que o levou a comentar num congresso de astronomia que a velocidade da luz poderia ser muito alta. Suas medições, combinadas com outras de Christiaan Huygens, chegaram a um valor abaixo do valor real mas muito mais alto do que o de qualquer fenômeno conhecido então[...]”**

Verbete 2:

“Durante muito tempo acreditou-se que a propagação da luz fosse instantânea, ou seja, ela seria imediatamente vista por um observador assim que fosse emitida a partir de uma fonte. James Clerk Maxwell mostrou que quando a luz se propaga através de um meio, ela o faz com uma velocidade determinada. Essa velocidade é extremamente alta quando comparada com velocidades registradas em fenômenos cotidianos. No vácuo, a velocidade de propagação da luz, qualquer que seja a frequência ou cor, é de aproximadamente $3,0 \times 10^5$ km/s ou $3,0 \times 10^8$ m/s. É no vácuo que a luz atinge sua maior velocidade.”†

Ambos os verbetes foram retirados de sites muito acessados por estudantes brasileiros. Nestes a informação é passada de forma muito compacta e descontextualizada, de maneira que questões importantes para o entendimento do conteúdo foram negligenciadas. Vamos fazer uma breve análise de cada um deles.

O verbete 1 foi retirado da enciclopédia online *Wikipedia*, mundialmente conhecida e acessada. Nele, o autor cita nomes famosos como Kepler, Bacon e Descartes sem explicitar suas ideias a respeito do tema. O termo ‘citaram’ sugere que estes não se envolveram profundamente com a questão ou mesmo que suas contribuições não foram significativas na

* Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Velocidade_da_luz>. Acesso em: 10 ago. 2017

† Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-velocidade-luz.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2017

época, o que claramente não é verdade, pois como apresentado anteriormente, todos eles tiveram grande participação no desenvolvimento do tema*.

Galileu é mencionado como responsável por um experimento que “*fracassou*”, o que pode sugerir erroneamente que dentre os nomes citados anteriormente, ele foi o único que investigou a questão mais a fundo. Contudo, ainda assim não temos condição de fazer uma análise crítica desta afirmação, pois uma vez que o experimento não nos foi apresentado, é impossível fazer qualquer avaliação do mesmo. Tudo que podemos inferir é que seu experimento deu errado, o que também não condiz com a realidade: apesar de não ter obtido o resultado esperado, seu experimento foi importante para discernir sobre a possível ordem de grandeza da velocidade da luz para o caso em que ela fosse finita.

Roemer é mencionado como aquele que “*descobriu acidentalmente*” a técnica de se medir a velocidade da luz. Dizer que Roemer “*descobriu*” alguma coisa supõe que ele foi o primeiro a notar um fato, enquanto o termo “*acidentalmente*” sugere que ele teve sorte em sua *descoberta*, como se tivesse aprendido sua “*técnica*” enquanto realizava uma atividade cotidiana. Nenhuma das afirmativas está correta: neste trecho é impossível conhecer porque Roemer observava Júpiter, ou com que frequência fazia isso. Além disso, Cassini, que observou as irregularidades nos eclipses de Io antes de Roemer, sequer é mencionado. Não há qualquer referência aos eclipses estudados no texto, tampouco a motivação para tais estudos.

Ao dizer que Roemer “*notou um atraso*” não é possível saber ao que o autor se refere. Huygens é inserido na história como alguém que “*combinou suas medidas com as de Roemer para calcular a velocidade da luz*” sugerindo que ele fez medidas de “*atrasos de Júpiter e Io*” como Roemer, o que também não condiz com os registros históricos†. A expressão “*valor real*” usada para qualificar o valor da velocidade da luz calculada por Huygens e Roemer deveria ser substituída por “*valor atual*” ou “*valor aceito atualmente*”, de maneira a evitar a suposição de um valor universal para a velocidade da luz.

O segundo verbete não menciona a figura de Kepler, Galileu, Descartes, Cassini, Roemer ou Huygens ou qualquer fator histórico ou social, colocando James Maxwell, que realizou seus estudos em eletromagnetismo nos anos 1854-1879 (53‡), como o único responsável pela resolução da questão. Além disso, o texto não apresenta nenhuma informação sobre como Maxwell supostamente fez sua descoberta.

* Ver capítulo 2 deste trabalho.

† Ver capítulo 3 deste trabalho.

‡ Id., 1981, p. 204.

Este tipo de recorte que torna as narrativas superficiais e descontextualizadas é muito comum em textos de divulgação científica e livros didáticos (2-4) que apresentam os resultados dos modelos teóricos de forma inapropriada, sem qualquer referência ao como essas ideias foram concebidas e desenvolvidas ao longo da história. (5) Este fenômeno a dificulta a aprendizagem dos conteúdos científicos e o desenvolvimento de posturas críticas e realistas a respeito de informações de cunho científico, gerando um distanciamento dos alunos do que chamamos de Natureza da Ciência (NDC).

A NDC refere-se a um conjunto de conhecimentos necessários para se compreender a ciência, o que envolve não somente questões referentes aos métodos empregados e suas características epistemológicas, mas também aspectos políticos, sociais, filosóficos, religiosos e culturais. (7,^{*}54-55) Existem diversas discussões na literatura a respeito da NDC e suas definições. Atualmente, temos duas grandes vertentes principais para se interpretar o que é Natureza da Ciência. (2,6,[†]55-56)

A primeira delas envolve uma lista de aspectos gerais que são fundamentais para a construção do saber científico. O número de elementos dessa lista varia de autor para autor, embora muitas dessas características sejam consensuais a maior parte deles. Lederman apresenta uma lista de sete aspectos que caracterizam a NDC: *diferenciação entre observação e inferência; diferenciação entre leis e teorias científicas; o conhecimento científico se baseia na observação do mundo natural; o conhecimento científico envolve imaginação e criatividade; o conhecimento científico é parcialmente subjetivo; a ciência é influenciada por fatores sociais e culturais; o conhecimento científico pode mudar.* (6,[‡]8,[§]55)

Lederman ainda argumenta que o aprendizado dessas ideias pode ser incorporado no ensino tradicional de ciências, bastando ao professor conduzir suas atividades de maneira a estimular uma postura reflexiva dos alunos. Ele recomenda que o professor trabalhe poucos aspectos da NDC em cada atividade, o que deve ser feito explicitamente através de cuidadosos questionamentos que façam os alunos se atentarem a essas ideias. Com o tempo, a discussão do tema se tornará mais natural e os estudantes estarão prontos para desenvolverem estas ideias independentemente. (56)

^{*} Id., 2016, p. 3-4.

[†] Id., 2016, p. 676-679.

[‡] Id., 2016, p. 677-678.

[§] Id., 2012, p. 9-18.

A segunda vertente estabelece que não é razoável limitar o estudo sobre NDC a uma lista de aspectos gerais a serem aprendidos, pois isso corresponderia a restringir a complexidade da ciência. Com isso, diversos autores começaram a trabalhar a ideia de *semelhança de famílias*. (57) Esta ideia entende que ainda que duas áreas distintas da ciência possuam temas e fundamentações teóricas diferentes (como física e ciências sociais, por exemplo), podemos encontrar procedimentos e métodos que fazem com que ambas as áreas possam ser consideradas como pertencentes a família da ciência. (7*-8)

Próximo à linha de *semelhança de famílias*, Douglas Allchin discute a pertinência da NDC ser ensinada pelo uso da visão *whole science*. Esse conceito surgiu da ideia de que os estudantes devem aprender ciência através de todos os elementos e situações que influenciam em sua produção. Dessa forma, identificar que um instrumento de medida se encontra mal calibrado, que generalizações foram feitas a partir de medidas limitadas, ou até mesmo que determinada produção científica pode estar atrelada a conflitos políticos e econômicos devem ser entendidos como ferramentas em potencial para um autêntico aprendizado de ciências. (2)

Ao longo dos últimos anos, tem havido uma mudança na compreensão acerca de quais melhores abordagens para NDC na Educação Básica e Superior. Nesse sentido, as vertentes de *semelhança de famílias* e *whole science* tem sido consideradas como mais adequadas do que a lista de aspectos gerais. Isso se deve ao fato de que ensinar uma lista de aspectos gerais pode ser interpretado pelos estudantes como mais um conteúdo a ser memorizado. (2,†6) As questões referentes a NDC devem ser problematizadas, de forma que o aprendizado deve surgir a partir de uma experiência espontânea do aluno com uma situação problema autêntica, incentivando uma postura reflexiva. (2‡)

Fundamentalmente, aprender sobre a NDC equivale a compreender o funcionamento da ciência. Segundo Allchin, adquirir este conhecimento é fundamental para julgar a confiabilidade das informações de cunho científico. Em um cenário ideal, a educação científica que inclui aspectos da NDC fará com que o aluno tenha contato com a abrangência da ciência, promovendo uma postura crítica a respeito do próprio conhecimento. Dessa forma, o estudante de ciências aprenderá não somente a avaliar criteriosamente a coerência de uma informação científica, como também a pensar e interpretar questões referentes a NDC em suas vidas de maneira geral e com isso se identificando como apto a fazer ciência. (2)

* Id., 2016, p. 8-9.

† Id., 2017, p. 20-21.

‡ Id., 2017, p. 22-23.

Uma das formas de se ensinar sobre NDC refere-se à utilização de episódios históricos. O professor poderá aplicar uma atividade envolvendo uma narrativa histórica, visando criar um debate estimulando uma postura investigativa por parte dos alunos. (11, 58*) Com isso, será possível abordar diversas questões envolvendo a NDC como: *“qual o papel dos erros no desenvolvimento de uma teoria?”*, *“quais são as relações entre teoria e experimento?”*, *“como as bases culturais, sociais e políticas afetam a produção científica?”*, *“existem outras formas de se interpretar um fenômeno?”*, entre outras.

Tendo estas ideias em mente, na próxima seção apresentaremos como o episódio histórico estudado pode ser utilizado como ferramenta para o ensino de NDC para estudantes de ciências, para enfim sugerir uma atividade didática aplicando o mesmo.

4.2 O que pode ser aprendido com o episódio histórico estudado?

O objetivo desta seção é mostrar como apresentar uma sugestão de atividade didática explorando aspectos da NdC no ensino médio e superior com intuito de promover um pensamento mais crítico sobre o fazer científico.

É muito comum encontrar em livros didáticos ou de divulgação científica a atribuição de uma determinada *“descoberta”* a um único pesquisador, dividindo a história em antes e depois desta descoberta. Assim, poderíamos nos perguntar *“quem descobriu que a luz se propaga com velocidade finita?”*. Por uma análise histórica da questão, é possível concluir que desde a Antiguidade muitos pensadores abordaram o tema sobre a finitude da velocidade da luz, contribuindo com o refinamento destas ideias no decorrer do tempo. Dessa forma, atribuir a finitude da velocidade da luz exclusivamente a Roemer (ou a qualquer outro) certamente constituirá um erro lógico, tendo em vista que ele provavelmente não poderia ter obtido seus resultados sem a contribuição direta e/ou indireta de todos aqueles que estudaram profundamente esta questão no passado.

Assim, uma pergunta mais pertinente sobre o ponto de vista histórico acerca deste tema pode ser: *“como se concluiu que a velocidade da luz é finita?”*. Com este questionamento, estamos dando uma ênfase maior no desenvolvimento da ideia ao longo do tempo e com isso permitimos que todos os pensadores que discutiram este assunto participem

* Id., 2012, p. 26-27.

da resposta. Mostramos alguns exemplos que permitem compreender estes argumentos com maior facilidade.

Como abordado no segundo capítulo deste trabalho, o pensamento cartesiano foi muito influente durante o século XVII. Dessa forma, não é possível compreender o pensamento dos contemporâneos de Roemer sem conhecer o pensamento de Descartes e como este se encontra inserido em uma visão muito ampla, que considera muitos aspectos da natureza e do universo.

No entanto, é interessante notar que diversos outros pensadores do período criticaram suas ideias, como Beeckman, Fermat, Huygens e Hooke. Beeckman e Hooke eram adeptos da finitude da velocidade da luz; Fermat considerou a aplicação do modelo óptico de Descartes no estudo da reflexão e refração como um caso particular de uma escolha, dentre infinitas possíveis, para o sistema de referência utilizado na descrição do movimento da luz; Huygens além de ser adepto da velocidade finita, explica como o argumento do eclipse lunar de Descartes deve ser considerado logicamente inválido. Isso nos faz compreender que mesmo um pensador influente como Descartes também foi alvo de críticas pertinentes.

Diante de todas as críticas, podemos imaginar que Descartes acreditava efetivamente em seus argumentos ou então que ele tinha conhecimento das possíveis falhas, desconhecia uma maneira de repará-las e não assumiu a verdade para não perder credibilidade. Essa segunda hipótese é plausível, visto que é o que ocorre com alguma frequência entre cientistas em geral. Entretanto, para os propósitos desta seção, não é relevante conhecer exatamente o que os envolvidos pensavam, ou mesmo adquirir qualquer convicção de que algum deles mentiu em algum ponto. O que de fato quero chamar atenção é que estas questões *podem* existir. Neste sentido, o estudo aprofundado de um episódio histórico é útil para notarmos como a produção de conhecimento filosófico e científico se encontra completamente correlacionada com muitos aspectos subjetivos do caráter humano.

O estudo histórico também possui o potencial de valorizar as ideias que são rejeitadas/esquecidas ao longo do tempo como uma forma de construção do conhecimento científico. No capítulo 3, estudamos a recepção das ideias de Roemer, as quais sofreram grande resistência, principalmente por parte da família Cassini. No entanto, estudando o episódio mais detalhadamente, é possível observar que os argumentos de Roemer para sustentar a hipótese de velocidade finita não eram mais razoáveis que os argumentos de Cassini para rejeitá-la.

É curioso destacar o fato de que Cassini já havia observado o atraso dos eclipses e até chegou a sugerir que isso poderia ser atribuído à velocidade finita da luz, embora tenha abandonado a hipótese. Do ponto de vista de Cassini, assumir que a velocidade da luz era finita representava abandonar uma série de pressupostos teóricos que sustentavam um sistema físico maior, sem que houesse algo mais consistente para substituí-lo. Além disso, o fato do mesmo fenômeno não ser observado com as demais luas de Júpiter não foi devidamente explicado por Roemer, justificando ainda mais o fato de Cassini acreditar em possíveis erros nas medidas de Roemer. Outro aspecto a ser considerado é o fato de que era vantajoso para Huygens se posicionar a favor de Roemer, pois o seu modelo óptico dependia fundamentalmente da hipótese da luz se propagar com velocidade finita. Hoje, mesmo sabendo que a luz se propaga com velocidade finita, deve-se reconhecer que a postura de Cassini foi sensata diante da situação.

A seguir, apresentamos uma proposta de atividade didática que visa a discussão de aspectos da natureza da ciência em uma atividade experimental em que o aluno poderá simular as observações de Roemer. O conteúdo proposto (velocidade da luz, refração e reflexão) geralmente faz parte da grade curricular de alunos tanto de nível médio quanto superior e foi escolhido por ser pouco explorado na literatura na área de ensino de física e astronomia. É importante chamar atenção que este roteiro é apenas um exemplo resumido de como incorporar as ideias da NdC em uma atividade didática, de maneira que ele pode ser modificado e/ou adaptado para se adequar às necessidades do professor e dos alunos.

4.3 Proposta de roteiro didático

Introdução

No ensino atual de ciências é comum observar que os estudantes são facilmente convencidos de que a luz se propaga com velocidade finita, muito embora este conceito não seja simples. Se levarmos em consideração nossa experiência cotidiana, por exemplo, não encontraremos evidências empíricas simples que nos façam acreditar que a luz se propaga com velocidade finita. Além disso, aceitar que ela é tão rápida e se propaga com velocidade de aproximadamente 300.000 km/s implica que não podemos entender esta informação usando somente nossa percepção. Para que os estudantes possam se conectar mais

profundamente com o conceito, proporcionando um aprendizado mais crítico sobre o tema, é importante conhecer como as ideias referentes a velocidade da luz se desenvolveram ao longo da história até que se pudesse estabelecer um consenso sobre elas.

O debate sobre a finitude da velocidade da luz vem desde a Antiguidade, onde filósofos como Empédocles (490-435 A.C.) e Euclides (320-270 A.C.) admitiam que a luz se *movimentava* com velocidade finita, enquanto outros como Aristóteles (384-322 A.C.) admitiram que ela é infinita. Pensadores como Ptolomeu e Ibn-Al Haytham (965-1039) e futuramente Galileu Galilei (1564-1642) e Johannes Kepler (1571-1630) também analisaram a questão sem chegarem a um consenso sobre ela. Mais tarde, as ideias de propagação instantânea da luz provenientes do modelo ótico de René Descartes (1596-1650) se tornaram muito influentes em seu período.

Na segunda metade do século XVII, um dos projetos da *Academie de Sciences de Paris* tinha como objetivo a construção de tabelas de efemérides dos eclipses dos satélites de Júpiter para que fossem usados como relógio astronômico no cálculo de longitudes terrestres. Durante as observações, os astrônomos Jean-Domenico Cassini (1625-1712) e Ole Roemer (1644-1710) observaram irregularidades nos horários de imersões e emersões dos eclipses da lua Io de Júpiter. Justificando as anomalias a partir da hipótese de que a luz se propaga com velocidade finita, Roemer pôde prever para a *Academie* que um eclipse de Io ocorreria 10 minutos após o horário estimado com base nos eclipses anteriores do satélite. Roemer ainda afirmou que a luz levaria aproximadamente 11 minutos para cruzar o raio da órbita terrestre.

Apesar de atualmente a hipótese de Roemer pode parecer uma justificativa natural, até este momento da história não existia consenso a respeito da questão da finitude da velocidade da luz. Além do fato de que haviam outras maneiras igualmente razoáveis de se explicar as irregularidades nos horários dos satélites, como as até então desconhecidas excentricidades de suas órbitas, Roemer nunca publicou os cálculos que embasaram sua conclusão, o que fez com que a questão da velocidade da luz continuasse dividindo opiniões entre a comunidade científica. A finitude da velocidade da luz somente passou a ser mais amplamente aceita após os estudos de James Bradley (1693-1762) sobre a aberração da luz em 1728.

Nesta atividade, os estudantes deverão questionar suas concepções referentes à velocidade da luz, assumindo uma posição crítica e investigativa acerca do tema. O problema será introduzido pela leitura de um texto sobre as observações dos eclipses dos satélites de

Júpiter durante o século XVII. A partir disso, os alunos deverão procurar interpretações que justifiquem os problemas, as quais deverão ser discutidas entre os colegas e o professor.

Em seguida, com a leitura de um segundo texto, os alunos conhecerão as justificativas da época para o problema levantado, que envolveram as explicações de Roemer e Cassini. Neste estágio o professor deverá discutir a coerência de cada uma das argumentações com os alunos, bem como comparar as interpretações levantadas anteriormente com aquelas fornecidas pelos astrônomos do período.

Para aproximar os alunos do episódio histórico, eles simularão as medidas de Roemer usando o software *Stellarium* e com os dados obtidos no programa poderão estimar um valor para a velocidade da luz. Durante este procedimento, os alunos terão contato com as dificuldades de obtenção e interpretação dos dados, adicionando ainda mais elementos para refletirem sobre toda a questão. Disponibilizamos um tutorial do *Stellarium* no fim deste roteiro para servir de suporte ao professor.

Por fim, o professor deverá concluir a atividade com um debate, levando em consideração todas as ideias levantadas e todos os resultados obtidos pelos alunos. É importante ressaltar que esta atividade não tem como objetivo obter respostas *certas* ou *erradas* dos alunos, mas sim estabelecer que toda dificuldade encontrada ao longo da mesma, seja de caráter interpretativo, observacional, ou criativo, são inerentes da produção científica.

O problema das longitudes e os eclipses dos satélites de Júpiter

Um dos grandes desafios no século XVII residia em encontrar um método para se calcular as longitudes terrestres para orientar os marinheiros durante as travessias transocêânicas e para o aprimoramento dos mapas do período. Uma possível alternativa encontrada para este problema consistiu em usar um fenômeno astronômico frequentemente observável como um relógio de referência, que poderia ser usado em qualquer ponto do globo. Os eclipses dos satélites galileanos de Júpiter (Io, Europa, Ganímedes e Calisto), já observados por Galileu Galilei (1564-1642) em 1610, foram escolhidos para este propósito.

Com isso, a Academia de Ciências de Paris tinha como um de seus principais projetos a produção de tabelas das efemérides dos satélites de Júpiter como método da obtenção das longitudes. Trabalhando com este propósito para a Academia, os astrônomos Jean-Domenico Cassini (1625-1712) e Ole Roemer (1644-1710) notaram certas irregularidades nos horários das imersões e emersões dos eclipses da lua Io de Júpiter: o período médio do satélite calculado quando a Terra encontra-se no trecho EH de sua órbita (ver figura) é menor do que aquele calculado para quando esta se encontra no trecho HE.

1 Elaboraões de interpretações livres para o fenômeno

Aqui, sugerimos ao professor que se certifique que os alunos compreenderam o problema descrito no texto, isto é, que o período médio de Io calculado varia dependendo da posição da Terra em sua órbita. Com o problema entendido, o professor deve pedir aos alunos sugerirem possíveis hipóteses para explicar a ocorrência deste fenômeno. Isto pode ser feito através de seus conhecimentos prévios sobre o assunto ou mesmo através da intuição: a formulação da hipótese deve ser livre e o professor deve enfatizar que não existem respostas erradas.*

* Para dar algum direcionamento aos alunos, o professor poderá sugerir que estes questionem seus próprios conhecimentos sobre o assunto, como: “o que é um eclipse?”, “porque observamos um eclipse?”, “qual pode ser a relação do movimento da Terra com o fenômeno?”.

2 Análise e debate das interpretações

Com as respostas dos alunos, o professor deverá promover um debate verificando a consistência lógica destas, com ênfase nas seguintes questões:

-Quão elaborada uma interpretação deve ser para parecer crível?

-Os alunos acreditam em suas próprias justificativas?

-Os alunos se sentiram capazes de elaborar uma justificativa?

-Qual a base de conhecimentos utilizada pelos alunos para elaboração da interpretação?

- O que é necessário para verificar a validade das interpretações sugeridas?

É interessante que neste momento o professor procure encontrar um sentido lógico em cada uma das respostas. Vale ressaltar que a ausência de uma interpretação também deve ser considerada como uma resposta válida, pois a falta de certeza, inspiração e criatividade são elementos que se encontram sempre presentes na vida de um cientista. Neste caso, o aluno deverá explicitar suas dificuldades de interpretar o fenômeno.

3 Análise sobre os conhecimentos envolvendo a velocidade da luz e a razoabilidade da hipótese de Roemer

Esta etapa pode ser apresentada através da leitura do seguinte texto:

Para justificar as irregularidades, Cassini assumiu a ideia de que estas eram causadas pela excentricidade da órbita dos satélites até então desconhecida no período. Por outro lado, Ole Roemer atribuiu que as variações no período de Io se devia ao tempo necessário para a luz percorrer a distância Terra Júpiter. Em setembro de 1676, Roemer anunciou que um eclipse de Io previsto para ocorrer em novembro de 1676 ocorreria 10 minutos atrasado, o que de fato foi verificado.

Em seu trabalho escrito para a Academia de Ciências de Paris, Roemer justifica que o período médio de Io é menor quando calculado no intervalo em que a Terra se aproxima de Júpiter do que no momento em que ela se afasta do mesmo, pois nessa última situação, a distância Terra-Júpiter está aumentando, de maneira que a luz necessitará de mais tempo

para percorrê-la. Roemer estima que a luz possui tal rapidez que precisa de 11 minutos para cruzar o raio da órbita Terrestre.

Neste período, ainda não havia um consenso sobre a questão da finitude da velocidade da luz. Cassini, adepto da propagação infinita da luz, discordou da hipótese de Roemer, argumentando que as irregularidades só eram observadas no primeiro satélite de Júpiter, e no caso delas serem causadas pelo fato da luz se propagar com velocidade finita, os mesmos atrasos deveriam ser observados nos demais satélites. Com esse raciocínio, Cassini atribuiu as irregularidades às possíveis excentricidades das órbitas dos satélites, até então desconhecidas. Além disso, Roemer nunca publicou suas medidas ou os cálculos que o levaram a sua conclusão.

Christian Huygens (1629-1695), que também foi membro da Academia de Ciências de Paris, trabalhou em diversas áreas como matemática, astronomia e óptica. Defendia que a luz se propagava através de ondas esféricas, com velocidade finita. É importante ressaltar que a finitude da velocidade da luz constitui uma das bases do seu modelo óptico. Ao tomar conhecimento das ideias de Roemer, Huygens ficou completamente convencido. No primeiro capítulo de seu livro sobre óptica, Huygens estima um valor para o raio da órbita da Terra, e admitindo que a luz necessita de 11 minutos para percorrer essa distância (dado fornecido por Roemer), ele calcula um valor de aproximadamente 230000 km/s para a velocidade da luz.

Aqui diversos caminhos diferentes podem ser seguidos pelo professor. Sugerimos que inicie o debate fazendo que os alunos se questionem sobre suas convicções sobre a velocidade da luz. É possível que parte deles já conheça a informação de que a luz se propaga com velocidade finita, no entanto é muito provável que a maior parte deles jamais tenha investigado os fundamentos dessa informação. Perguntas como: “é óbvio que a luz possui velocidade finita?”, “qual experiência do cotidiano mostra que a luz possui velocidade finita?”, “como geralmente medimos velocidades (de automóveis, objetos etc), e de que forma poderíamos medir a velocidade da luz?”. Também pode-se comparar a luz com o som: “sabemos que o som também se propaga com velocidade finita. De que forma podemos constatar isso em nosso cotidiano? É possível aplicar as mesmas constatações para a luz?”. Estas perguntas têm o propósito de problematizar as convicções dos alunos a respeito do tema, mostrando que algumas questões tidas inicialmente como óbvias podem ser mais complexas do que imaginamos.

Tendo questionado o conceito da finitude da velocidade da luz, pode-se avaliar a lógica das hipóteses de Cassini: é possível compreender que explicações diferentes daquela usada por Roemer poderiam existir para justificar as irregularidades no período de Io de forma razoável, como as dificuldades nas observações dos astros devido à desconhecida excentricidade das órbitas dos satélites. Além disso, pode-se questionar: “*como poderiam aceitar definitivamente a hipótese de Roemer se as mesmas irregularidades não eram observadas nos demais satélites?*”. Dessa forma, ambas as hipóteses possuem suas fragilidades e devem ser vistas como equivalentes diante de sua lógica interna. Sugerimos que o professor enfatize o aspecto de como a aceitação de ideias sofre influências do contexto histórico e das bases filosóficas utilizadas por cada pensador. Isso pode ser feito questionando a postura de Huygens, que aceitou facilmente as ideias de Roemer, ainda que estas pudessem ter alguns problemas de consistência.

4 Cálculo da velocidade da luz através do Stellarium

Tendo todas essas ideias anteriores em mente, os alunos deverão tentar medir a velocidade da luz reproduzindo as medidas de Roemer através do *Stellarium*. Os alunos devem ser apresentados às ferramentas básicas do programa, o suficiente para que sejam capazes de observar eclipses dos satélites de Júpiter em qualquer data e local desejados. Para isso os alunos devem:

- Obter o horário de uma ocultação de Io no disco de Júpiter (t_A).
- Obter o horário de uma segunda ocultação de Io no disco de Júpiter (t_B), alguns meses depois da primeira medida.
- Com o período de Io (T_{Io}) determinar o número de revoluções (n) que Io dá no intervalo de tempo decorrido entre as duas medidas (ΔT_1), isto é: $n = \Delta T_1 / T_{Io} = (t_B - t_A) / T_{Io}$.
- Calcular o horário o tempo decorrido entre as duas observações (ΔT_2) com base no período e no número de revoluções de Io, obtidos no passo anterior, isto é: $\Delta T_2 = n \cdot T_{Io}$.
- Determinar a diferença entre o intervalo de tempo medido (ΔT_1) e calculado (ΔT_2): $\Delta T = \Delta T_2 - \Delta T_1$.
- Usando os dados fornecidos pelo Stellarium, calcular a variação da distância entre a Terra e Júpiter no intervalo de tempo considerado (ΔD), e assim determinar o valor da velocidade da luz: $c = \Delta D / \Delta T$.

Mais detalhes de como isso pode ser feito estão apresentados nos anexos no fim deste roteiro.

A sugestão é que os alunos não possuam um roteiro de como executar esta tarefa passo a passo e nem muitas instruções do professor, mas sim que pensem em uma forma de relacionar os horários dos eclipses e as variações entre as distâncias Terra-Júpiter fornecidas pelo programa para calcular a velocidade da luz. Esta etapa pode ser modelada de acordo com o tempo que o professor dispõe para realização da atividade. Contudo é importante ressaltar que nesta etapa os alunos deverão usar sua criatividade para conectar as informações para se chegar em uma conclusão.

Ao fim do processo, as seguintes questões podem ser usadas para realização de uma reflexão geral sobre todo o procedimento:

- *Quais foram os dados coletados para o cálculo?*
- *Quais as maiores dificuldades envolvendo as medidas?*
- *Qual a precisão dos possíveis valores obtidos?*
- *Quais são as maiores fontes de erro?*

5 Debate final envolvendo síntese das ideias apresentadas

Sugerimos a seguir alguns tópicos que podem ser reforçados na conclusão da atividade:

- A ciência cria modelos funcionais para descrever a realidade e não a realidade propriamente dita. Dessa forma, o desenvolvimento científico está diretamente atrelado com o uso da imaginação e da criatividade dos pesquisadores para criar, testar e fundamentar suas ideias. Isto pôde ser notado através do estudo das hipóteses de Roemer e Cassini para justificar as irregularidades no período de Io.

- A ciência é produzida inicialmente através do questionamento. É comum observar o hábito de aceitar informações sem ter um bom entendimento delas. Avaliar as bases de nossas convicções é importante para adquirirmos bons critérios para julgar a confiabilidade de uma informação, exatamente como feito durante os questionamentos à velocidade da luz. Esta ideia deve se tornar um hábito.

- As teoria científicas dependem do período histórico em que elas são concebidas. Devemos nos lembrar que como elas são fruto da atividade humana, questões políticas,

sociais, filosóficas e muitas outras certamente estarão presentes em seu desenvolvimento. Os eclipses de Io só foram massivamente observados devido à necessidade de se calcular as longitudes para se produzir mapas mais precisos. Outro exemplo, é que muitos pensadores trabalhavam com a hipótese de que a luz se propagava com velocidade infinita, pois até o momento, os modelos que tinham essa ideia como base (como o de Descartes) eram bem fundamentados e satisfatórios para descrição dos fenômenos estudados.

Estes tópicos devem ser usados apenas como referência para o professor, e não como uma lista de tópicos a serem aprendidos pelos alunos. Sugerimos que esta etapa seja feita através de um diálogo onde os alunos devem expor sua opinião sobre a atividade, explicando quais ideias mais chamaram sua atenção.

Anexo A da Atividade – O *Stellarium*

O *Stellarium* é um software gratuito de simulação planetária, idealizado e desenvolvido inicialmente por Matthews Gates em 2006, e atualmente conta com um banco de dados com mais de 600.000 estrelas catalogadas. Os requisitos mínimos do sistema para instalação do programa, bem como link para o download podem ser encontrados na página dos desenvolvedores*. Nesta seção, iremos apresentar alguns dos recursos do *Stellarium*, o suficiente para execução da atividade proposta.

Figura A1 – Tela principal do *Stellarium*. Nela temos dois menus principais: um de configurações gerais do programa, localizado à esquerda da tela, e outro de controle das animações, na horizontal. Os principais botões do programa se encontram numerados de 1 a 11.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após instalar e abrir o programa, o usuário se depara com a tela apresentada pela Figura A1. O programa é dividido em dois menus principais: um vertical posicionado à esquerda da tela, que se refere às janelas de configurações gerais do programa, e um horizontal, no qual encontram-se os botões de controle da animação gerada pelo programa. Vamos detalhar algumas funções destes menus. A maior parte dos botões e funções deste programa possui uma tecla de atalho, que especificaremos entre colchetes. Seguindo pela numeração estabelecida na figura, temos:

* <http://www.stellarium.org/>

1. Janela de ajuda [F1]

Aqui você pode checar informações sobre o programa em si, bem como detalhes sobre a versão. Um fato interessante deste botão é que o usuário pode ter acesso a todas as teclas de atalho que foram estabelecidas nas configurações do *Stellarium*.

2. Janela de Configurações [F2]

Neste menu podemos alterar diversas configurações do programa, entre elas, o idioma, a disposição das informações na tela e até mesmo as teclas de atalho.

3. Janela de pesquisa [F3]

Figura A2 – Janela de localização do *Stellarium*. Com ela é possível localizar um corpo celeste no céu através de uma lista ou simplesmente digitando o nome do corpo desejado.

Fonte: Elaborada pelo autor.

No *Stellarium* podemos sempre clicar em algum objeto no céu para obter mais informações sobre ele. Contudo, se o objeto desejado não estiver a vista, podemos utilizar a *Janela de localização* para encontrá-lo, o que pode ser feito através de uma lista ou especificando o nome do objeto procurado, exatamente como mostrado na Figura A2.

4. Janela de opções do céu e visualização [F4]

Figura A3 – Janela de visualização do *Stellarium*. Aqui podemos alterar diversas propriedades de visualização do programa. Para o nosso propósito é interessante notar a opção ‘*Simular a velocidade da luz*’, destacada em vermelho na figura. Ativando esta caixa, o programa levará em conta o tempo que a luz necessita para viajar do astro até o observador para simular a posição dos corpos celestes no céu

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta janela podemos mudar diversos aspectos da visualização das animações, como escolher observar o céu a partir da superfície de outros corpos celestes (como Marte, Júpiter, Lua, etc.), a presença da atmosfera, entre outros. Uma opção interessante deste menu está destacada na Figura A3: podemos escolher simular ou não a velocidade da luz, isto é, as posições dos astros no céu irão levar em consideração o tempo que a luz necessita para viajar do objeto ao observador.

5. Janela de data e hora [F5]

Através desta janela podemos especificar data e hora para realizar as observações. A escolha pode ser feita tanto no formato ano/mês/dia/hora quanto em dias julianos, o que se encontra exemplificado na Figura A4 a seguir. A data escolhida ficará registrada no painel horizontal, exatamente como destacado em amarelo na Figura A1.

Figura A4 –Janela de data e hora do *Stellarium*. Nela podemos especificar um determinado horário para observar o céu, através do calendário tradicional ou em dias julianos

Fonte: Elaborada pelo autor.

6. Janela de localização [F6]

Figura A5 –Janela de localização do *Stellarium*. Aqui é possível alterar o local de onde serão realizadas as observações, digitando o nome da cidade ou especificando suas coordenadas geográficas

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta janela é possível selecionar o local de onde serão realizadas as observações, como mostrado pela Figura A5. Podemos fazer uma busca através do nome de uma cidade ou país, bem como escolher um local qualquer especificando sua coordenadas geográficas. Também é possível especificar a altitude e o fuso horário do local. Assim como a data, o local

de observação escolhido será exibido na barra de ferramentas horizontal, como indicado em vermelho na Figura A1.

7. Grade Azimutal [Z]

Mostra a grade azimutal, onde as linhas verticais correspondem ao azimute e as horizontais à altura do astro observado. Esta ferramenta é útil para saber se um determinado corpo se encontra observável na realidade.

8. Superfície [G]

Exibe ou retira a imagem da superfície na qual o observador se encontra. Útil para se obter uma imagem mais privilegiada da esfera celeste.

9. Atmosfera [A]

Mostra ou não a atmosfera. Geralmente retira-se a atmosfera para observar o movimento dos astros durante o dia.

10. Centrar no objeto selecionado [Barra de espaço]

Este botão faz com que um corpo selecionado fique centralizado na tela. Esta ferramenta é relevante para ser dar zoom em um astro ou para observar fenômenos que ocorrem ao redor de um determinado do mesmo, como os eclipses.

11. Controle da velocidade de passagem de tempo

Podemos controlar as animações através deste conjunto de botões que determinam a velocidade de passagem de tempo. Podemos acelerar [J] ou desacelerar [L] a passagem do tempo. O efeito se intensifica pressionando-se a tecla mais de uma vez, podendo ser cancelado através da tecla K, a partir da qual também podemos pausar ou iniciar a animação.

12. Visão panorâmica do céu [Teclas direcionais]

Permite uma vista panorâmica de 360° completa, tanto na direção polar quanto na azimutal. Também pode ser feito clicando com o botão o esquerdo do mouse no céu e arrastando na direção desejada.

13. Zoom In/Out [Page up/Page down]

Aproxima ou afasta a visão do objeto selecionado, exatamente como mostrado na Figura A6 a seguir. Também pode ser feito através do botão de rolamento do mouse.

Figura A6 – Sistema de zoom do *Stellarium*. As figuras representam um zoom no planeta Saturno, o suficiente para poder ver a órbita de seus satélites

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conhecer este conjunto de ferramentas deve ser o suficiente para se usufruir do programa sem maiores dificuldades.

Anexo B da Atividade – Calculando a velocidade da luz pelo *Stellarium*

Como o *Stellarium* fornece as distâncias relativas entre a Terra e outros astros, em qualquer ponto de suas órbitas, podemos simular os eclipses de Io e assim obter uma estimativa para o valor da velocidade da luz. O cálculo realizado nesta seção é feito a partir da hipótese de que a luz necessita de tempo para viajar de Júpiter até a Terra. Por simplicidade, usaremos ocultações ao invés dos eclipses propriamente ditos para usar o disco de Júpiter como uma referência para as medidas.

Tendo assumido isto, a velocidade da luz pode ser estimada calculando a diferença de tempo ΔT entre duas situações distintas: o tempo ΔT_1 decorrido entre duas ocultações de Io observadas e o intervalo de tempo ΔT_2 entre as mesmas duas ocultações calculado a partir do período médio de Io. Para isso, precisamos dos horários de duas ocultações de Io e seu período sideral. Diferente de Roemer, nos encontramos em um cenário tecnológico muito privilegiado, de maneira que estas informações podem ser facilmente obtidas através do *Stellarium*.

Antes de começar é necessário levar alguns detalhes em consideração. Uma propriedade muito particular deste tipo de procedimento é que temos condições de escolher observar qualquer ocultação, até mesmo as que não se encontram visíveis na realidade (isto é, visíveis através de um telescópio convencional). Dessa forma, é evidente que conseguiremos obter alguma estimativa do *Stellarium* se observarmos duas ocultações sucessivas, por exemplo. No entanto, o intervalo de tempo ΔT obtido neste caso será muito pequeno e com isso improvável de ser sensível em um experimento realístico. Por esta razão, é interessante escolhermos duas ocultações que sirvam para todos os propósitos práticos, fazendo com que a atividade possua não somente uma lógica teórica mas também uma conexão experimental, de maneira a tornar possível a realização das mesmas medidas feitas no *Stellarium* em um observatório real. Para isso, é importante lembrar de marcar a janela ‘Simular velocidade da luz’ na *Janela de visualização*, de forma a obter sempre os horários corretos.

Outro aspecto relevante é o movimento relativo entre a Terra e Júpiter. Para que o intervalo de tempo ΔT seja coerente com o proposto por Roemer, devemos observar somente

imersões de Io quando a Terra está se aproximando de Júpiter, e somente emersões quando ela está se afastando do mesmo*. Para isso é necessário conhecer as datas de conjunção† e oposição‡ da Terra com Júpiter‡, as quais podem ser encontradas a partir de qualquer calendário de eventos astronômicos anuais.

Figura B1 – Imagem de simulação no *Stellarium* na qual configuramos o programa para observar Júpiter a partir da cidade de São Carlos. Na circunstância mostrada, temos que o planeta se encontra acima de 60° de altura no período da noite, o que revela que nesta data Júpiter provavelmente se encontrará observável na prática

Fonte: Elaborada pelo autor.

O procedimento é simples: basta observar o início de uma ocultação de Io (momento em que Io entra atrás do disco de Júpiter) através da animação do *Stellarium* e anotar seu horário de início. Para isso, podemos acompanhar o movimento do satélite através de um zoom em Júpiter. O processo pode ser agilizado acelerando a animação ou mesmo escolhendo as datas através da *Janela de data e hora*. Nas medidas que usarei de exemplo, definirei a cidade de São Carlos como referência para as observações.

* Como explicado na seção 3.3, esta divisão foi uma maneira de Roemer organizar seus dados para identificar diferenças no período médio de Io quando a Terra está se aproximando ou afastando de Júpiter. Naturalmente, uma vez assumida a hipótese de que a luz demanda de tempo para percorrer a distância Terra-Júpiter, podemos calcular sua velocidade através das imersões ou emersões independente do movimento relativo entre os planetas.

† Conjunção de planeta exterior: instante em que o Sol se encontra entre a Terra e o planeta considerado. Nesta situação a distância entre a Terra e o planeta é a máxima possível.

‡ Após uma oposição a Terra estará se afastando de Júpiter. O contrário ocorre durante a conjunção.

Como no ano de 2017 Júpiter se encontra em oposição com o Sol no dia 7 de abril, procuramos uma emergência de Io observável algum tempo depois desta data. Escolhi o dia 28/05, pois nesta data a emergência de Io ocorrerá após as 18 horas, além de Júpiter se encontrar acima de 60° de altura, exatamente como mostrado na Figura B1. Com um zoom, podemos observar o início de uma ocultação, ilustrado pela Figura B2 a seguir (neste caso estamos ocultando a atmosfera Terrestre para melhorar a visualização).

Figura B2 – Simulação no *Stellarium* de um zoom em Júpiter alguns instantes antes do início da imersão de Io em seu disco. Na prática, esta imersão não pode ser observada em condições normais pois ela irá ocorrer em um momento do dia em que o Sol ainda se encontra alto

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura B3 a seguir ilustra o processo de obtenção da data de uma emergência. Através dela concluímos que uma estimativa da data t_A do fim desta ocultação corresponde a:

$$t_A = 28/05/2017 \ 19h.37m.6s.$$

Figura B3 – Procedimento para determinação do horário da emergência de Io no *Stellarium*. Para contornar o problema de visualização, podemos selecionar Io e acompanhar o movimento do satélite através do cursor vermelho de seleção. Esta é uma excelente aproximação, tendo em vista que o cursor possui praticamente o mesmo diâmetro do astro selecionado

Fonte: Elaborada pelo autor.

Aplicando a correção devido à equação do tempo*, que para essa data corresponde à +2m. 40s. obtemos:

* A equação do tempo fornece o valor da correção do tempo solar médio para o tempo solar aparente. Uma calculadora online destas correções pode ser encontrada em <https://www.minasi.com/doi.htm>.

$$t_A = 28/05/2017 \ 19h.39m.46s. = 2457902,444287 \text{ JD.}$$

Usaremos as datas em dias julianos* para evitar conversões de unidades desnecessárias quando formos efetuar operações com estes números.

Aqui devemos anotar a distância relativa d_A entre a Terra e Júpiter nesta situação, o que pode ser feito selecionando Júpiter no instante t_A e conferindo as informações que aparecem no canto superior esquerdo da tela. Fazendo isso, obteremos:

$$d_A = 718,233.10^6 \text{ km}$$

Figura B4 – Observação da segunda emersão através do *Stellarium*. Como no caso anterior contornamos o problema do desaparecimento do Satélite através do cursor de seleção.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para que o valor ΔT não seja muito pequeno, vamos procurar a próxima emersão por volta de dois meses após a primeira. Como mostrado na Figura B4, elegemos o eclipse que ocorrerá em 29/07. Repetindo o procedimento descrito anteriormente obtemos a data t_B desta emersão:

* A data juliana consiste em um método de contar dias continuamente a partir de uma determinada data arbitrária, sem separação da data em horas, meses ou anos (contada à partir do meio dia do dia 01/01/4713 a.C. para o calendário juliano, ou 24/11/4714 a.C. no calendário gregoriano). Isso é pertinente pois quando desejamos conhecer o tempo decorrido entre duas datas, podemos efetuar uma subtração direta dos dias julianos sem recorrer a qualquer conversão de unidades. O próprio *Stellarium* fornece as datas em dias julianos. Basta digitar a data desejada no menu *Data e Hora* e selecionar a aba *Dia juliano*, como mostrado na Figura A4.

$$t_B = 29/07/2017 \text{ } 18h.25m.5s.$$

Aplicando a correção devido a equação do tempo (-6m.31s.) e convertendo para dias julianos encontramos:

$$t_B = 29/07/2017 \text{ } 18h.18m.34s. = 2457964,387898 \text{ } JD.$$

E também a distância Terra-Júpiter d_B :

$$d_B = 855,245.10^6 km.$$

Assim, o intervalo de tempo ΔT_1 decorrido entre as duas ocultações observadas é:

$$\Delta t_1 = t_B - t_A = 2457964,387898 - 2457902,444287 = 61,943611 \text{ dias.}$$

Podemos calcular o intervalo ΔT_2 assumindo que a luz se propaga instantaneamente. Para isso, deve-se calcular o número de revoluções n de Io ao redor de Júpiter no intervalo de tempo ΔT_1 , que corresponde a:

$$n = \Delta T_1 / T_{Io} = 61,943611 / 1,77 = 34,996390 \sim 35 \text{ revoluções,}$$

onde $T_{Io} = 1,77 \text{ dias}$ é o período sideral de Io, que pode ser obtido do próprio *Stellarium* selecionando Io, como por exemplo na Figura B4. Considerando que após a observação da primeira emersão Io realizou 35 revoluções ao redor Júpiter, temos que o tempo decorrido ΔT_2 sob estas hipóteses equivale a:

$$\Delta T_2 = n \cdot T_{Io} = 1,77 \cdot 35 = 61,95 \text{ dias.}$$

Apesar de $\Delta T_2 > \Delta T_1$ enquanto esperamos que nesta situação o contrário ocorra (pois nesta situação a Terra está se afastando de Júpiter), isso não deve ser considerado um grande problema, pois estas medidas são muito sensíveis a oscilações na faixa de minutos. Se tivéssemos considerado o período médio de Io como $T_{Io} = 1,769 \text{ dias}$, teríamos obtido um valor de $\Delta T_2 = 61,915 \text{ dias}$. Contudo, optamos por usar somente os dados do *Stellarium* para que o cálculo possua lógica interna, diminuindo assim as chances de erros provenientes de oscilações nos dados. A sensibilidade das medidas será discutida mais adiante.

Usando os dados obtidos, podemos finalmente encontrar a diferença de tempo ΔT :

$$\Delta T = |\Delta T_2 - \Delta T_1| = 61,95 - 61,943611 = 0,006389 \text{ d.} \sim 9,2 \text{ m.,}$$

que é expressivo o suficiente para ser observado na realidade.

Como temos a variação da distância Terra-Júpiter $\Delta D = |d_B - d_A|$ no intervalo de tempo decorrido entre os dois eclipses, podemos finalmente estimar a velocidade da luz:

$$c = \Delta D / \Delta T = (855,322 - 718,233) \cdot 10^6 / 0,006389 \sim 21457035529,816 \text{ km/dia.}$$

o que equivale a:

$$c = 248.345,318 \text{ km/s.}$$

É importante lembrar que aqui não estamos nos preocupando com os algarismos significativos pois o propósito aqui não é calcular um valor preciso para a velocidade da luz, mas sim ter um reconhecimento das dificuldades envolvidas no próprio procedimento de se realizar as medidas. Dessa forma, escolhemos manter os algarismos significativos do próprio *Stellarium* para efetuar os cálculos.

Comparando com o valor exato atualmente aceito de $c = 299.792,458 \text{ km/s}^*$, o velocidade calculada possui um erro de aproximadamente 17%. A primeira vista, um erro dessa magnitude pode parecer estranho, uma vez que estamos usufruindo de uma ferramenta com dados muito precisos. No entanto, a única medida que precisamos realizar (obter os horários das imersões e emersões) é extremamente sensível. Note o que ocorreria se tivéssemos medido t_A um minuto atrasado em relação ao obtido anteriormente, exatamente como mostrado na Figura B5:

* Valores retirados da página do NIST: physics.nist.gov/constants.

Figura B5 – Emerção de Júpiter na data 28/05/2017 observada pela simulação do Stellarium. Nesta situação consideramos que o fim do eclipse ocorreu às 19:38:06, exatamente 1 minuto após a medida utilizada nos cálculos anteriores

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta situação, já aplicando a correção da equação do tempo para esta data, obtemos:

$$t'_A = 28/05/2017 \ 19h.40m.46s. = 2457902,444981 \text{ dias julianos.}$$

e consequentemente temos que os valores atualizados de ΔT_1 , n e ΔT_2 para esta situação são:

$$\Delta T_1 = 2457964,387898 - 2457902,444981 = 61,942917 \text{ dias;}$$

$$n = \Delta T_1 / T_{Io} = 61,94291 / 1,77 = 34,99599 \sim 35 \text{ revoluções;}$$

$$\Delta T_2 = n \cdot T = 35 \cdot 1,77 = 61,95 \text{ dias.}$$

E com isso, podemos calcular o novo ΔT :

$$\Delta T = |\Delta T_2 - \Delta T_1| = 61,95 - 61,942917 = 0,007083 \text{ dias} \sim 10,19 \text{ minutos,}$$

que é maior que o ΔT calculado anteriormente em 1 minuto, exatamente como deveria ser.

Nesse caso, a nova distância entre a Terra e Júpiter corresponde a:

$$d'_A = 718,231 \cdot 10^6 \text{ km}$$

Assim, podemos calcular o novo valor da velocidade da luz c' :

$$c' = \Delta D / \Delta T = (855,245 - 718,231) \cdot 10^6 / 0,007083 \sim 19344063250,035 \text{ km/dia.}$$

em unidades mais familiares, temos finalmente que:

$$c' = 223.889,621 \text{ km/s.}$$

Este valor se encontra ainda mais distante do real, e possui uma diferença da ordem de 24.000 km/s, aproximadamente 10% do valor calculado anteriormente. Dessa forma, o que separa a observação inicial do valor exato é um erro na observação as ocultações da ordem de aproximadamente 2 minutos.

Um erro desta ordem de grandeza faz necessário a realização de várias medidas. Como pode ser observado através nas Figuras B3 e B5, em um minuto a animação permanece praticamente inalterada. Além disso, na prática os satélites naturais de Júpiter serão vistos como apenas pontos no céu, ao invés de discos, como no *Stellarium*. Dessa forma, pode ser razoável identificar o início da emergência em um ponto no qual Io se encontra um pouco mais

distante do disco de Júpiter, uma vez que na prática Io só se tornará visível quando estiver saído por completo de trás do mesmo.

Levando todas estas ideias em consideração, sugerimos que os erros sejam minimizados por vias tradicionais de estatística: realizando diversas medidas, considerando diferentes pontos de referência para as imersões/emersões e calculando médias com todos os resultados obtidos deste procedimento.

Além disso, com a informação de que as observações de Roemer foram feitas no século XVII, a grande sensibilidade na medição do horário dos eclipses no *Stellarium* pode intrigar, uma vez que se a dificuldade existe mesmo com a tecnologia disponível atualmente, quão habilidosos foram os astrônomos do passado para realizarem essas observações? E quão precisas suas medidas poderiam ser? Este tipo de pergunta pode conduzir o aluno a pensar e aprender de forma mais investigativa, fazendo com que ele se aproxime do papel de um pesquisador e com isso questione a validade das ideias de Roemer e de outros pensadores. Assim, ele estará adquirindo um maior contato com o processo criativo de produção de conhecimento científico, ou de maneira geral, incorporando as ideias referentes à natureza da ciência.

5 Conclusão

Estudar o desenvolvimento de um conceito ao longo da história é uma boa maneira de se garantir uma compreensão mais crítica e realista sobre o mesmo. Na questão referente à finitude da velocidade da luz, vimos neste trabalho como estes questionamentos ocuparam as mentes de diversos pensadores, desde a antiguidade até o século XVII. Ao estudar suas ideias, aprendemos que as teorias científicas servem como modelos funcionais para descrição da realidade, de maneira que diferentes modelos, fundamentados em princípios totalmente opostos, podem ser utilizados para explicar o mesmo fenômeno. A questão mais expressiva a respeito deste ponto pôde ser observada através do estudo dos modelos ópticos de René Descartes e Christiaan Huygens: o primeiro entende que a velocidade da luz é infinita enquanto o segundo assume que a mesma é finita, mas ambos derivam as mesmas expressões empíricas para a reflexão e refração da luz.

Ainda sobre a compreensão adquirida através do estudo de um episódio histórico, pode-se mencionar o fato de que o desenvolvimento e a aceitação das ideias dependem do contexto histórico, político e social em que estão inseridas. Os eclipses de Io somente foram observados com o intuito de se calcular longitudes para obtenção de melhores mapas. Ninguém poderia prever que este fato levaria a uma possível constatação da finitude da velocidade da luz. Também podemos mencionar que um dos motivos para Cassini não aceitar as ideias de Roemer foi que a ideia da propagação instantânea da luz era uma das bases de pensamento do período, legado que se deve em grande parte aos estudos de Descartes. Por fim, podemos mencionar o caso da aceitação pouco criteriosa de Huygens das ideias de Roemer, que se deu principalmente pelo fato de sua hipótese colaborar com o modelo óptico que já estava sendo desenvolvido por Huygens.

Referente à constatação de Roemer, pode-se dizer que ainda que atualmente consideramos sua hipótese como correta para justificar o fenômeno observado, o conjunto de medidas utilizado por ele para elaborar sua constatação são frágeis. Acreditamos ser este o motivo pelo qual Roemer não deu detalhes de seus cálculos para a obtenção do valor de 11 minutos mencionado em seu artigo para a *Académie de Sciences de Paris*. A cautela de Cassini em admitir a hipótese de Roemer se fazia muito razoável, uma vez que o movimento dos satélites não era muito conhecido no período.

O desenvolvimento da atividade didática nos mostrou que existem grandes dificuldades em sua aplicação. Como já previsto por Allchin e outros autores, a formação tradicional de um professor de ciências não garante que este esteja apto a ensinar questões referentes à natureza da ciência. Esperamos que com a aplicação desta atividade seja possível mostrar ao menos que não devemos subestimar nenhuma forma de conhecimento científico, e ao mesmo tempo não nos considerar incapazes de dar qualquer contribuição: devemos assumir a postura de sempre questionar as bases do nosso próprio conhecimento e com isso adquirir bons critérios para avaliar a confiabilidade de qualquer material científico.

REFERÊNCIAS

- 1 BOGLIOLO, L. *Bogliolo patologia*. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2006.
- 2 ALLCHIN, D. Beyond the consensus view: whole science. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, v. 17, n.1, p. 18-26, 2017.
- 3 MARTINS R. M. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica. 1 - física clássica. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 15, n. 3, p. 243-264, 1998.
- 4 ———. Como não escrever sobre história da física - um manifesto historiográfico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n.1, p. 113-129, 2001.
- 5 ———. A história das ciências e seus usos na educação. Pp. xxi-xxxiv. In: SILVA, C. C. (Ed.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Livraria da Física, 2006.
- 6 KAMPOURAKIS, K. The general aspects conceptualization as a pragmatic and effective means to introducing students to nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 53, n. 5, p. 667-682, 2016.
- 7 ACEVEDO-DIAZ, J. A.; GARCIA-CARMONA, A. Algo antiguo, algo nuevo, algo prestado. tendencias sobre la naturaleza de la ciencia en la educación científica. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, v. 13, n. 1, p. 3-19, 2016.
- 8 MATTHEWS, M. R. Changing the focus: from nature of science to features of science. In: KHINE, M. S. (Ed.). *Advances in nature of science research: concepts and methodologies*. Dordrecht: Springer, 2012. p. 3-26.
- 9 FEYNMAN, R. P. *Surely you're Joking Mr. Feynman*. adventures of a curious character. New York: Bantam Book-W.W. Norton Company Inc., 1985.
- 10 ACEVEDO-DIAZ, J. A. Formación del profesorado de ciencias y enseñanza de la naturaleza de la ciencia. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, v. 7, n. 3, p. 653-660, 2010.
- 11 MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.12, n.3, p. 164-214, 1995.
- 12 COHEN I. B. *Roemer and the first determination of the velocity of the light*. New York: The Burndy Library, 1944.
- 13 LINDBERG, D. C. *Theories of vision from Al-Kindi to Kepler*. London: Chicago University Press, 1976.
- 14 ARISTÓTELES. *The works of Aristotle translated to english*. Oxford: Oxford University, 1967-1968. 12 v.
- 15 TOOMER, G. J. Ptolomy (Claudius Ptolemaeus). In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 11. p. 186-206.

- 16 SABRA, A. I. *Theories of light from Descartes to Newton*. London: Oldbourn Book Co LTD., 1967.
- 17 ———. Ibn Al-Haytham (Alhazen). In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 6, p. 189-210.
- 18 CROMBIE, A. C.; NORTH J. D. Roger Bacon. In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 1, p. 377-385.
- 19 GALILEI, G. *Dialogues concerning two new sciences*. New York: The Micmillian Company, 1914.
- 20 ALEXANDER, J. H. *Universal dictionary of weights and measures, ancient and modern; reduced to the standards of United States of America*. Baltimore: WM Minifie and Co, 1850.
- 21 WALLER, R. *Essayes of natural experiments made in the Academie del Cimento*. New York: Johnson Reprint Corporation, 1964.
- 22 GINGERICH, O. Johannes Kepler. In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 7, p. 289-312.
- 23 TOSSATO, R. C. Os fundamentos da óptica geométrica de Johannes Kepler. *Scientiae studia*, v. 5, n. 4, p. 471-499, 2007.
- 24 DI LISCIA; D. A. Johannes Kepler. Disponível em:
<<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/kepler/>>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- 25 MARTINS, R. M.; SILVA, C. C. As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 37, n. 4, p. 4202-1-4202-32, 2015.
- 26 SMITH, A. M. Descartes's theory of light and refraction: a discourse on method. *Transactions of the American Philosophical Society*, v. 77, n. 3, p. 1-92, 1987.
- 27 DESCARTES, R. *Oeuvres de Descartes*. Paris: L. Cerf, 1897-1913, v. 6.
- 28 SAKELLARIADIS, S. Descartes' experimental proof of the infinite velocity of light and Huygens' Rejoinder. *Archive for History of Exact Sciences*, v. 26, n.1, p. 1-12, 1982.
- 29 DESCARTES, R. *Oeuvres de Descartes*. Paris: L. Cerf, 1897-1913, v. 1.
- 30 HUYGENS, C. *Tratados sobre a luz*. Tradução Roberto de A. Martins. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1986.
- 31 HOOKE, R. *Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon*. London: Jo. Martyn; Ja. Allestry, 1665.
- 32 EASTWOOD, B. S. Descartes on refraction: scientific versus rhetorical method. *Isis*, v. 75, n. 3, p. 481-502, 1984.
- 33 DESCARTES, R. *Oeuvres de Descartes*. Paris: L. Cerf, 1897-1913, v. 10.
- 34 CROMBIE, A. C. Marin Mersenne. In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 9, p. 316-322.
- 35 FERMAT, P. *Oeuvres de Fermat*. Paris: Gauthier-Villars et fils, 1891-1912, v. 2.

- 36 LAUGINIE, P. How did light acquire a velocity. *Science & Education*, v. 22, p. 1537–1554, 2013. doi 10.1007/s11191-012-9487-z.
- 37 BOBIS, L.; LEQUEUX, J. Cassini, Roemer and the velocity of light. *Journal of Astronomical History and Heritage*, v. 11, n. 2, p. 97-105, 2008.
- 38 GRANT, R. *History of physical astronomy from the early ages to the middle of the nineteenth century*. London: H. G. Bohn, 1852.
- 39 NAH, W. L. *The mathematics of longitude*. Singapore: National University of Singapore, 2000-2001.
- 40 TATON, R. Gian Domenico Cassini (Jean-Domenico Cassini). In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 3. p. 100-104.
- 41 KRISTENSEN, L. K.; PEDERSEN, K. M. Roemer, Jupiter's satellites and the velocity of light. *Centaurus*, v. 54, n. 1, p. 4-38, 2012.
- 42 HALL, A. R. Erasmus Bartholin. In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 1. p. 481-482.
- 43 KOPAL, Z. Römer, Ole Christensen. In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 1. p. 525-527.
- 44 ROEMER, O. Demonstration concerning the motion of light. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, v. 12, p. 893-894, 1677.
- 45 MEYER, K. Om Ole Rømers Opdagelse af Lysets Tøven. *Naturvidenskabelig og Matematisk Afdeling*, v. 12, p.105-145, 1915. Disponível em: <https://da.wikisource.org/wiki/Om_Ole_R%C3%B8mers_Opdagelse_af_Lysets_T%C3%B8ven>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- 46 SHEA, J. H. Ole Rømer, the speed of light, the apparent period of Io, the Doppler effect, and the dynamics of Earth and Jupiter. *American Journal of Physics*, v. 66, n. 7, p. 561-569, 1998.
- 47 SEIDELMANN, P. K. *Explanatory supplement to the astronomical almanac*. California: University Science Books, 1992.
- 48 BOS, H. J. M. Christiaan Huygens. In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 6. p. 597-613.
- 49 CASSINI, J. D. De l'origine et du progrès de l'astronomie et de son usage dans la géographie et la navigation. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, v. 8, p. 1-52, 1693a.
- 50 ———. Les hypothèses et les tables des satellites de Jupiter, reformées sur de nouvelles observations. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, v. 8, p. 317-392, 1693b.
- 51 HUYGENS, C. *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*. La Haye: M. Nijhoff; Amsterdam: Swets & Zeitlinger B.V., 1676-1684, v. 6.
- 52 ALEXANDER, A. F. O'D. BRADLEY, J. In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 2, p. 387-389.

- 53 EVERITT, C. W. F. James Clerk Maxwell. In: GILLIESPIE, C. C. (Ed.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. v. 9. p. 198-230.
- 54 MCCOMAS, W. F.; ALMAZROA, H.; CLOUGH, M. P. The nature of science in science education: an introduction. *Science & Education*, v. 7, n. 6, p. 511-532, 1998.
- 55 MOURA, B. A. O que é natureza da ciência e qual sua relação com história e filosofia da ciência. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 7, n. 1, p. 32-46, 2014.
- 56 LEDERMAN, N. G.; LEDERMAN, J. S. Revising instruction to teach nature of science: modifying activities to enhance student understanding of science. *Science Teacher*, v. 71, n. 9, p. 36-39, 2004.
- 57 IRZIK, G.; NOLA, R. A family resemblance approach to the nature of science for science education. *Science and Education*, v. 20, n. 7-8, p. 591-607, 2011.
- 58 CARMONA, A. G.; VÁZQUEZ, A. A.; MANASSERO M. M. M. Comprensión de los estudiantes sobre naturaleza de la ciencia: análisis del estado actual de la cuestión y perspectivas. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 30, n. 1, p. 23-34, 2012.

Anexo A - Trecho da carta de Fermat para Mersenne, na qual ele critica a demonstração de Descartes para a reflexão da luz.

[...] Por exemplo na figura em anexo, onde AF não é mais paralelo a CB, e o ângulo $C\hat{A}F$ é obtuso, porque não imaginamos que a determinação da bola se movendo de A para B é composta de dois outros (movimentos), os quais um o faz descendo através da linha AF em direção à linha CE e o outro o faz em direção a AF? Por isso, é verdade dizer que a medida que a bola desce ao longo da linha AB, ela avança em direção a AF e este progresso é medido pela perpendicular traçada da linha AF aos vários pontos que podem ser tomados entre A e B. E isto é para ser entendido, no entanto, quando AF faz um ângulo agudo com AB, caso contrário, se for reto ou obtuso, a bola não irá avançar em direção a AF, como é fácil de se entender.

Supondo isto, nós podemos concluir pela mesma razão que o autor (Descartes), que o corpo suave CE apenas impede o primeiro movimento, sendo oposto a eles apenas nesta direção; então, não estando no caminho do segundo, a perpendicular BH sendo traçada, e HF sendo igual a HA, segue que a bola deve ser refletida ao ponto F, e então o ângulo FBE será maior que o ABC.

Isto é portanto uma evidência que, de todas as divisões da determinação do movimento, que são infinitas, o autor utilizou apenas aquela que pode servir para dar a ele sua conclusão, da qual sabemos tão pouco como antes. E certamente parece que uma divisão imaginária que pode ser variada em um infinito número de maneiras nunca pode ser a causa do real efeito..

Pela mesma razão, nós podemos refutar a prova de seus fundamentos para Dióptrica, desde que eles são baseados em um discurso similar.

Anexo B - Tradução da versão em inglês da divulgação dos resultados Roemer publicado pelo Journal des Sçavans

Uma Demonstração referente ao Movimento da Luz, transmitida de Paris, no Jornal de Sçavans, e aqui em inglês

Filósofos tem trabalhado por muitos anos para decidir através da experiência, se a ação da luz pode ser transportada em um instante para diferentes locais, ou se ela requer tempo. Sr. Roemer da Academia Real de Ciências desenvolveu uma maneira, concebida através de Observações do primeiro satélite de Júpiter, na qual ele demonstra, que para a distância de aproximadamente 3000 léguas, a qual é muito próxima da grandeza do diâmetro da Terra, a luz não necessita de nenhum segundo de tempo.

Considere que (na Figura 7) A seja o Sol, B Júpiter, C o primeiro satélite de Júpiter, o qual entra na sombra de Júpiter, saindo desta em D; e considere EFGHKL seja a Terra localizada em diversas distâncias de Júpiter.

Agora, suponha que a Terra, estando em L em direção à segunda quadratura de Júpiter, tenha visto o primeiro Satélite no instante de sua imersão ou entrada na sombra em D; e que depois de aproximadamente 42,5 horas depois, (depois de uma revolução deste Satélite) a terra esteja em K, veja o satélite retornando em D; isto é uma manifestação, de que se a luz requer tempo para atravessar o intervalo LK, o satélite será visto retornando depois em D, do que se a terra estivesse permanecido em L, de modo que a revolução deste satélite sendo assim observado pelas emersões, será atrasada por um tempo, a medida que a luz deve ter levado em passar de L para K, então, do contrário, na outra quadratura FG, onde a terra pela aproximação irá encontrar a luz, as revoluções das imersões irão parecer encurtadas por tanto tempo quanto àqueles em que as emersões pareceram ser aumentado. E em 42,5 horas, no qual este satélite fica muito próximo de realizar uma revolução, a distância entre a Terra e Júpiter em ambas as quadraturas varia ao menos 210 diâmetros da terra, seguindo que se para cada diâmetro da Terra era necessário um segundo de tempo, para a luz levaria 3,5 minutos para cada um dos intervalos GF, KL; os quais deveriam provocar aproximadamente metade de um quarto de uma hora entre duas revoluções do primeiro satélite, uma observada em FG, e a outra em KL, onde não se observou nenhuma diferença sensível.

Ainda por acaso, não segue por consequência, que a luz não necessita de tempo. Para isso, depois do Sr. Roemer ter examinado a coisa mais de perto, ele encontrou, que o que não era sensível em duas revoluções, tornou-se muito considerável em muitas juntas, e que, por exemplo, quarenta revoluções observadas do lado F, podem ser sensivelmente menores, que quarenta outras observadas em qualquer outro local do zodíaco onde Júpiter pode se encontrar; e na proporção de vinte e dois para qual intervalo de HE, no qual é o dobro do intervalo que provém consequentemente para o sol.

A necessidade desta nova equação do retardamento da luz, é um estabelecimento de todas as observações que tem sido realizadas na Academia Real, e no Observatório, no espaço de oito anos, e foi tardiamente confirmada pela emersão do primeiro satélite observado em Paris em 10 de Novembro em 5 horas, 35' . 45''. a noite , 10 minutos mais tarde do que era esperado pela dedução daqueles que foram observados no mês de agosto, quando a Terra estava muito próxima de Júpiter: na qual Sr. Roemer previu e contou para Academia no início de Setembro.

Mas para retirar toda a dúvida, que está inequação, é causada pelo retardamento da Luz, ele demonstra, que isto não pode provir de nenhuma excentricidade, ou qualquer outra causa daquelas que são comumente alegadas para explicar as irregularidades da Lua e de outros planetas; embora ele esteja bem avisado, que o primeiro satélite de Júpiter era excêntrico, e que, apesar de suas revoluções estavam avançadas ou atrasadas de acordo com a aproximação ou afastamento de Júpiter do Sol, como também que as revoluções do *primum mobile* eram desiguais; ele ainda acredita que, estas três causas para a inequação não impede a primeira de ser manifestada.

Anexo C - Versão em inglês da divulgação dos resultados de Roemer
publicado pelo Journal des Sçavans.

(893)

A Demonstration concerning the Motion of Light, communicated from Paris, in the Journal des Sçavans, and here made English.

Philosophers have been labouring for many years to decide by some Experience, whether the action of Light be conveyed in an instant to distant places, or whether it requireth time. M. *Romer* of the *R. Academy* of the Sciences hath devised a way, taken from the Observations of the first Satellit of *Jupiter*, by which he demonstrates, that for the distance of about 3000 leagues, such as is very near the bigness of the Diameter of the *Earth*, Light needs not one second of time.

Let (in *Fig. 11.*) A be the *Sun*, B *Jupiter*, C the first Satellit of *Jupiter*, which enters into the shadow of *Jupiter*, to come out of it at D; and let EFGHKL be the *Earth* placed at divers distances from *Jupiter*.

Now, suppose the *Earth*, being in L towards the second Quadrature of *Jupiter*, hath seen the first Satellit at the time of its emerſion or iſſuing out of the shadow in D; and that about $42\frac{1}{2}$ hours after, (*vid.* after one revolution of this Satellit,) the *Earth* being in K, do ſee it returned in D; it is manifeſt, that if the Light require time to traVERSE the interval LK, the Satellit will be ſeen returned later in D, than it would have been if the *Earth* had remained in L, ſo that the revolution of this Satellit being thus obſerved by the Emerſions, will be retarded by ſo much time, as the Light ſhall have taken in paſſing from L to K, and that, on the contrary, in the other Quadrature FG, where the *Earth* by approaching goes to meet the Light, the revolutions of the Immerſions will appear to be ſhortned by ſo much, as thoſe of the Emerſions had appeared to be lengthned. And becauſe in $42\frac{1}{2}$ hours, which this Satellit very near takes to make one revolution, the diſtance between the *Earth* and *Jupiter* in both the Quadratures varies at leaſt 210 Diameters of the *Earth*, it follows, that if for the account of every Diameter of the *Earth* there were required a ſecond of time, the Light would take $3\frac{1}{2}$ minutes for each of the intervals GF, KL; which would cauſe near half a quarter of an hour between two revolutions of the firſt Satellit, one obſerved in FG, and the other in KL, whereas there is not obſerved any ſenſible difference.

Yec

(894)

Yet doth it not follow hence, that Light demands no time. For, after M. *Romer* had examin'd the thing more nearly, he found, that what was not sensible in two revolutions, became very considerable in many being taken together, and that, for example, forty revolutions observed on the side F, might be sensibly shorter, than forty others observed in any place of the Zodiack where *Jupiter* may be met with; and that in proportion of twenty two for the whole interval of H E, which is the double of the interval that is from hence to the Sun.

The necessity of this new Equation of the retardment of Light, is established by all the observations that have been made in the *R. Academy*, and in the *Observatory*, for the space of eight years, and it hath been lately confirmed by the Emerſion of the first Satellit observed at *Paris* the 9th of *November* last at 5 a Clock, 35'. 45". at Night, 10 minutes later than it was to be expected; by deducing it from those that had been observed in the Month of *August*, when the *Earth* was much nearer to *Jupiter*: Which M. *Romer* had predicted to the said Academy from the beginning of *September*.

But to remove all doubt, that this inequality is caused by the retardment of the Light, he demonstrates, that it cannot come from any excentricity, or any other cause of those that are commonly alledged to explicate the irregularities of the *Moon* and the other Planets; though he be well aware, that the first Satellit of *Jupiter* was excentrick, and that, besides, his revolutions were advanced or retarded according as *Jupiter* did approach to or recede from the Sun, as also that the revolutions of the *primum mobile* were unequal; yet saith he, these three last causes of inequality do not hinder the first from being manifest.