

Isaac Newton e a dupla refração da luz

(*Isaac Newton and the double refraction of light*)

Breno Arsioli Moura¹

Centro de Ciências Naturais e Humanas, Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil

Recebido em 23/5/14; Aceito em 12/7/14; Publicado em 3/10/2014

Este artigo apresenta uma abordagem histórica sobre a dupla refração da luz, especialmente sobre as ideias de Isaac Newton. Inicialmente, são discutidos os estudos de Erasmus Bartholinus, que descobriu o fenômeno e o descreveu em 1669, e de Christiaan Huygens, que elaborou um modelo explicativo baseado em uma concepção vibracional para a luz em seu *Tratado sobre a luz* (1690). Em seguida, analiso em detalhes o conceito de lados da luz elaborado por Newton para explicar o fenômeno, descrito nas “Questões” de seu *Óptica* (1704). Com isso, pretende-se delinear outros elementos da óptica newtoniana ainda desconhecidos por acadêmicos e educadores. **Palavras-chave:** Newton, óptica, dupla refração, polarização, história da ciência.

This paper presents a historical approach about the double refraction of light, especially the ideas of Isaac Newton. Initially, I discuss the studies of Erasmus Bartholinus, who discovered and described the phenomenon in 1669, and also the studies of Christiaan Huygens, who developed an explanatory model based on a vibration conception of light in his *Treatise of Light* (1690). Next, I analyze the concept of sides of light elaborated by Newton to explain the phenomenon and described in the “Queries” of the *Opticks* (1704). Through this analysis, I intend to outline other elements of Newtonian optics not yet known by scholars and educators.

Keywords: Newton, optics, double refraction, polarization, history of science.

1. Introdução

Os estudos em óptica de Isaac Newton (1643-1727) são geralmente celebrados como grandes conquistas da história da ciência. Sua teoria sobre luz e cores, seus experimentos com prismas e sua concepção corpuscular para a luz influenciaram uma geração de filósofos naturais no século XVIII, contribuindo para consolidar uma imagem idealizada de seu legado [1, 2]. Porém, até os dias atuais, o conhecimento sobre a óptica newtoniana é quase restrito às partes mais popularizadas de seu *Óptica*, publicado originalmente em 1704, especialmente aquelas que enfatizaram o viés indutivista de Newton [3].

Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse dos historiadores da ciência pelas partes da obra newtoniana ainda pouco examinadas, tais como seus estudos em química, alquimia e religião, bem como de elementos de sua obra científica que não são aceitos atualmente. Na literatura especializada, já é possível encontrar trabalhos que exploram essas perspectivas [4-7].

Este artigo insere-se na proposta de estudar ideias newtonianas não mais aceitas, analisando sua explicação para a dupla refração por meio do conceito de

“lados da luz”, descrito nas “Questões” do Livro III do *Óptica*. Atualmente, o fenômeno é considerado um caso de polarização da luz e, assim, explicado por meio de uma concepção ondulatória moderna, que não existia na época.

A dupla refração foi descrita pela primeira vez por Erasmus Bartholinus (1625-1698) em 1669, ao analisar a estranha refração produzida pelo cristal-da-Islândia.²

Um raio de luz incidente na superfície refratora deste cristal sofria uma refração ordinária, respeitando a lei de Snell-Descartes, e uma extraordinária, que não conseguia ser explicada por essa lei. Posteriormente, o fenômeno também foi estudado por Christiaan Huygens (1629-1695), para o qual ofereceu uma minuciosa explanação em seu *Tratado sobre a luz*, publicado em 1690.

Newton conhecia os estudos de Huygens, mas rejeitou suas explicações baseadas em uma concepção vibracional para a luz [8]. Para tratar da dupla refração, ele pensou que a luz tivesse “lados”, uma propriedade original e imutável que faria com que os raios fossem refratados ordinária ou extraordinária. Os “lados” foram concebidos a partir de uma teoria corpuscular para a luz – que Newton implicitamente defendeu nas “Questões”

¹E-mail: breno.moura@ufabc.edu.br.

²O cristal-da-Islândia é uma variedade da calcita

do *Óptica* – e utilizados para reprovar concepções vibracionais como a de Huygens.

A análise crítica do conceito de “lados da luz” pretende mostrar, por um lado, como Newton foi capaz de explicar um fenômeno atualmente enquadrado em uma concepção ondulatória utilizando uma teoria corpuscular, que considerava a luz como uma bola de bilhar e detentora de uma gama de propriedades originais e imutáveis. Por outro, o estudo assinalará que este conceito apresentou alguns aspectos problemáticos relevantes, que poderiam ser alvo de críticas na época, mas não foram.

O artigo está dividido em quatro partes. Na primeira delas, comentarei sobre os relatos originais feitos por Bartholinus, buscando entender como ele descreveu o fenômeno da dupla refração e suas principais características. Em seguida, analisarei brevemente os estudos de Huygens. Na terceira parte, discutirei em detalhes os trechos do *Óptica* de Newton que tratam da dupla refração, no sentido de compreender seu conceito de “lados” da luz. Na quarta parte, tecerei alguns comentários mais específicos sobre este conceito.

2. A descoberta da dupla refração por Bartholinus

A dupla refração foi descrita por Bartholinus em um breve ensaio publicado em latim em 1669 e intitulado *Nova Experimenta Crystalli Islandici Disdiaclastici*. Há, pelo menos, duas traduções do texto para o inglês: uma parcial, disponível em *A Source Book in Physics* [9] e outra integral, realizada pelo historiador da ciência J. A. Lohne [10]. Utilizei esta última para fundamentar a análise que segue. Os trechos foram traduzidos livremente para o português.

No *Experimenta*, Bartholinus abordou algumas particularidades das refrações produzidas pelo cristal-da-Islândia. Este sólido é atualmente caracterizado pela sua anisotropia ótica, que faz com que um raio de luz incidente seja duplamente refratado. Por isso, qualquer objeto visto por meio deste sólido estará duplicado. Além do cristal-da-Islândia, apresentam este comportamento o gelo, o quartzo e a siderita.³

Bartholinus buscou estabelecer propriedades gerais do cristal e do fenômeno produzido e não apresentou modelos para explicá-lo. Ao todo, ele descreveu dezoito experimentos.⁴

Após admirá-lo [o cristal] por um longo período, eu comecei a examiná-lo com experimentos que podem se mostrar úteis e agradáveis a mentes nobres e aplicadas

cujo objetivo seja promover o conhecimento [...]. [13]

Inicialmente, Bartholinus referiu-se às características físicas do cristal, tais como sua forma e aparência. Segundo ele, a aparência externa do cristal seria semelhante a do floco de neve, do sal e de outros minerais e cristais. Ele era constituído por superfícies planas e lados equidistantes uns dos outros, na forma de um prisma romboide.⁵ Bartholinus notou que se o cristal fosse quebrado, as partes resultantes manteriam a mesma forma do original (Fig. 1).

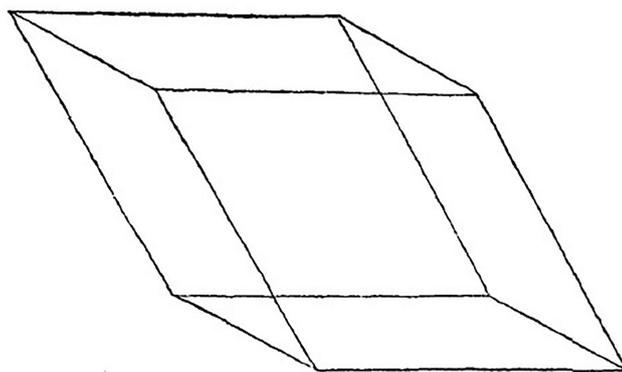


Figura 1 - Representação de Bartholinus para retratar a forma do cristal-da-Islândia. Retirada de Lohne [10, p. 108].

Após descrever outras características do cristal, tais como suas propriedades elétricas e sua rigidez, Bartholinus procedeu à análise da dupla refração dos objetos vistos por meio dele.

[...] objetos que são vistos através do cristal não mostram, como no caso de outros corpos transparentes, uma única imagem refratada, mas uma imagem duplicada. [14]

Bartholinus descreveu o fenômeno da seguinte maneira: suponhamos que dois objetos *A* e *B* de tamanhos quaisquer sejam colocados sob a superfície inferior *LMNO* do cristal (Fig. 2). Ao olharmos para os objetos através da superfície superior *RSPQ*, veríamos *A* em *DE* e *B* em *G* e *H*. No caso do objeto *A*, ele explicou porque a imagem *DE* tinha seu meio mais escuro e suas extremidades mais claras.

Quando o objeto *A* é duplicado pelo cristal e se move com o prisma, as duas imagens devem coincidir em algum momento, tal como *DE*, onde elas se sobrepõem parcialmente. Contudo, uma vez que cada uma das imagens é mais fraca que o objeto *A*, todas as partes sobrepostas serão mais escuras que as extremidades, pois onde as imagens

³Para um estudo mais detalhado das explicações atuais para a dupla refração, ver Halliday e cols. [11].

⁴Há diferenças no número de experimentos entre a versão impressa e o manuscrito inicial de Bartholinus. Segundo Lohne, Bartholinus teria percebido a importância de alguns novos experimentos para a conclusão de que o fenômeno era causado pela refração e não pela reflexão e, então, os incluiu na versão final do *Nova Experimenta*. Ver Lohne [12].

⁵O romboide é um paralelogramo cujos lados adjacentes possuem tamanhos diferentes. Diferencia-se, dessa forma, do losango, cujos lados têm o mesmo tamanho.

diluídas se encontram elas emitirão uma cor mais intensa. [15]

No caso do objeto *B*, Bartholinus percebeu que as cores das imagens pareciam mais diluídas que a cor original e também notou que uma das imagens de *B* se movia, enquanto a outra permanecia fixa se movimentássemos o cristal. Nos experimentos seguintes, ele argumentou mais detalhadamente sobre esta questão.

Segundo ele (Fig. 3), se posicionássemos nosso olho no ponto *O* e olhássemos para um objeto *A* colocado sob o cristal, veríamos suas duas imagens em *C* e *B*. Bartholinus notou que a imagem que se movia sempre estava na direção das partes inclinadas do cristal, ou seja, na direção *DE*. Caso girássemos o prisma, a imagem *B* se moveria no círculo desenhado na figura, rodeando a imagem fixa *C*.

As descrições de Bartholinus são bastante claras e objetivas. Ele buscou descrever de modo sucinto as principais propriedades do cristal e do fenômeno, sem, contudo, se preocupar em explicá-las. Restava um problema que deveria ser solucionado: o que ocasionava a duplicação da imagem? Atualmente, não teríamos nenhuma dificuldade em dizer que o fenômeno é resultado de uma dupla refração provocada pela estrutura cristalina particular do cristal-da-Islândia, que polariza a onda luminosa incidente. Na época, contudo, essa explicação não existia.

Bartholinus parece ter concluído que o fenômeno seria um caso de refração, pela semelhança com a refração comum da luz por sólidos transparentes.

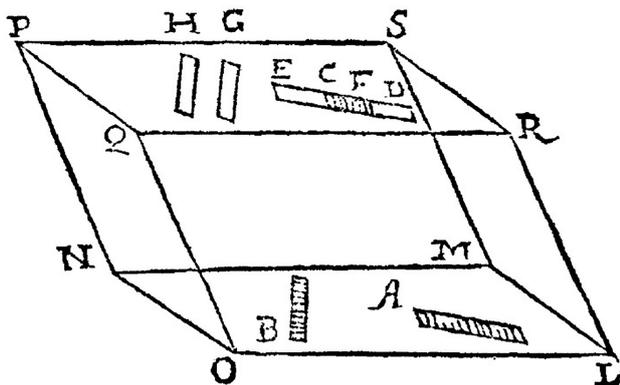


Figura 2 - Bartholinus discutiu a formação de duas imagens dos objetos *A* e *B*, colocados abaixo da superfície inferior do cristal. Retirada de Lohne [10, p. 114].

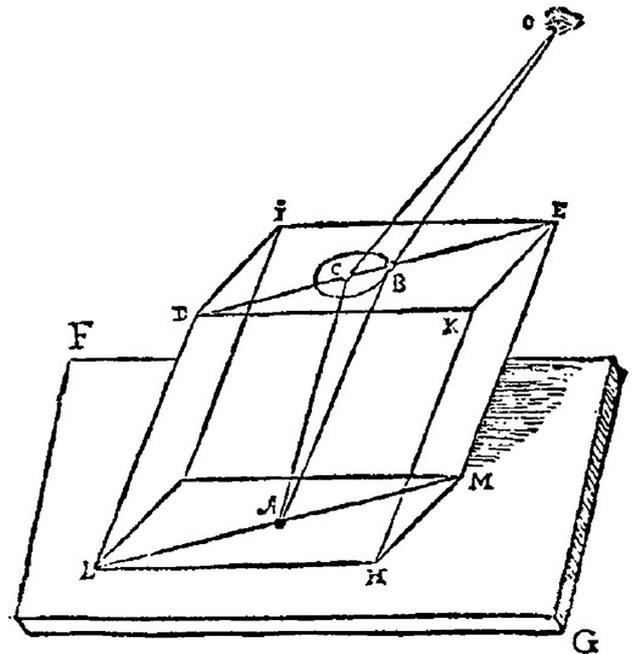


Figura 3 - Representação de Bartholinus para ilustrar o giro da imagem *B* ao redor da imagem *C*, ambas do objeto *A*. Retirada de Lohne [10, p. 121].

Portanto, eu concluí que neste caso ocorreu uma dupla refração. Entretanto, uma vez que nós observamos que as duas imagens no cristal-da-Islândia são diferentes, [pois] enquanto uma sempre permanece fixa, mas a outra é móvel, eu decidi distinguir as duas refrações por nomes diferentes. Aquela que refrata a imagem fixa ao olho eu chamarei de velha refração, mas aquela que refrata a imagem móvel do objeto ao olho [eu chamarei de] nova refração.⁶ [16]

Atualmente, denominamos as duas refrações de ordinária e extraordinária. A atribuição de nomes diferentes às refrações não foi por acaso, uma vez que Bartholinus percebeu que o raio refratado ordinariamente (velha refração) obedecia às leis conhecidas, enquanto o raio extraordinário “apresenta, eu acho, uma refração não conhecida e não sujeita às suas leis usuais” [16].

Para balizar sua conclusão, Bartholinus descreveu o seguinte experimento (Fig. 4): suponha que se coloque um objeto *A* sob um cristal *NPRQTBS*. Posicionando o olho em *M*, perpendicular à superfície *NPRQ*, vemos o objeto em *V*, sem desvio, uma vez que, pelas regras comuns da refração, o raio refratado continua perpendicular à superfície. Entretanto, como a imagem do objeto *A* é duplicada, também a vemos no ponto *X*, resultado de um desvio provocado pela refração extraordinária. Se estivermos em *M* e vemos a imagem em

⁶Bartholinus alterou os termos posteriormente para refração “comum” e “incomum” (ou, em inglês, *usual* e *unusual*). Ver Lohne [16, nota 24].

X, Bartholinus conclui que ela não poderia ser causada senão por uma lei da refração desconhecida, diferente das leis comuns.

Essa conclusão seria corroborada se observássemos o objeto *A* pelo ponto *O*. Nesse caso, veríamos o raio sendo desviado em *Y* (não indicado na figura), e, portanto, obedecendo às leis da refração, e o raio sendo propagado sem desvio em *Z*, resultado da refração extraordinária.

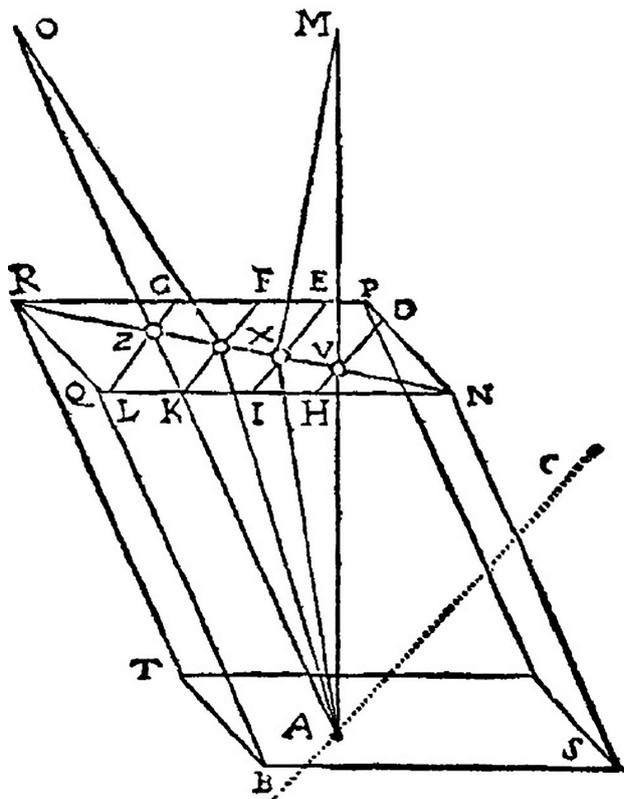


Figura 4 - Representação de Bartholinus para ilustrar que o raio extraordinário não obedecia às leis usuais da refração. Retirada de Lohne [10, p. 130].

Embora tenha percebido que o fenômeno era causado por outro tipo de refração, Bartholinus não elaborou um modelo explicativo no *Nova Experimenta*. Entretanto, sua descrição simples e objetiva das características básicas do cristal-da-Isândia e da dupla refração provavelmente possibilitou a rápida difusão da descoberta. Segundo Lohne [17], a campanha de divulgação feita por ele na época fez com que filósofos

naturais como Robert Hooke (1635-1703), Huygens e Newton logo tomassem conhecimento do cristal e de suas propriedades.

3. Os estudos de Huygens

Huygens começou a estudar o estranho fenômeno da dupla refração por volta de 1672, realizando seus primeiros experimentos no final deste mesmo ano e obtendo uma explicação para ele em meados de 1677 [18]. Os resultados de sua investigação sobre o tema foram descritos em seu *Tratado sobre a Luz*, publicado em 1690. Para o estudo que segue, utilizei a versão em português publicada nos *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, em 1986 [19].

O *Tratado* é um extenso estudo geométrico e matemático da natureza física da luz e de seu comportamento. Por meio de uma concepção vibracional⁷ para a luz, Huygens analisou a propagação da luz, a refração, reflexão, a refração na atmosfera e, por fim, a dupla refração⁸. Seu discurso é conciso e muito elucidativo, denotando sua destreza em tratar matematicamente os fenômenos ópticos.

Para Huygens, a luz seria um movimento da matéria. Esse movimento seria iniciado na fonte primária da luz e propagado pela matéria adjacente em todas as direções. Não havia a ideia de periodicidade, sendo os pulsos de luz transmitidos a distâncias aleatórias da fonte luminosa. Para ele, um único corpúsculo de matéria luminosa poderia servir de meio de propagação de vários pulsos, sem influência de uns sobre os outros.

Nesse modelo mecânico, Huygens admitiu que a intensidade do pulso luminoso fosse se perdendo à medida que ele se propagasse continuamente pela matéria. Porém, como poderíamos admitir que a luz do Sol, por exemplo, conseguisse se espalhar a tão longa distância da Terra? Para solucionar esta questão, ele elaborou um pressuposto básico, que seria conhecido posteriormente como “princípio de Huygens”.

O “princípio de Huygens”⁹ estabeleceu que um pulso gerado por um ponto luminoso originava pulsos secundários, os quais, compostos, contribuíam para reforçar o pulso original (Fig. 5). Isso explicaria porque a luz do Sol conseguiria se propagar a grande distância até a Terra sem se extinguir.

⁷Embora a concepção de Huygens seja usualmente classificada como *ondulatória*, alguns historiadores têm apontado que esta denominação não é adequada. Shapiro [20], por exemplo, prefere utilizar o termo *continuum theory of light* para teorias como a de Huygens. Hakfoort [21], por sua vez, afirma que uma teoria realmente ondulatória veio apenas com Leonhard Euler (1707-1783) em meados do século XVIII, optando por classificar a concepção de Huygens como uma “teoria de pulsos”. Por fim, Cantor [2] chama esta teoria de “vibracional”. Em geral, estes autores afirmam que a teoria de Huygens não pode ser considerada ondulatória por ele não ter atribuído à luz elementos característicos desta teoria, tais como frequência ou comprimento de onda. Neste trabalho, utilizarei o termo de Cantor, mas manterei a palavra “onda” nas citações de Huygens, conforme está escrito na tradução para o português do *Tratado*.

⁸Não cabe neste trabalho discorrer sobre toda a teoria sobre luz de Huygens. Para uma análise mais detalhada deste assunto, sugiro a leitura da tradução comentada para o português feita por Martins [19] e os textos de Silva [22] e Krapas et. al. [23]. Na literatura internacional, há excelentes trabalhos que analisam em detalhes as concepções de Huygens, tais como Sabra [24] e Shapiro [18].

⁹Historiadores da ciência indicaram alguns problemas em relação ao “princípio de Huygens” e sua argumentação no *Tratado*, tais como suas dificuldades em explicar a intensidade da luz ou o papel das ondas secundárias. Para um exame melhor dessas questões, recomendo Martins [25] e Shapiro [26].

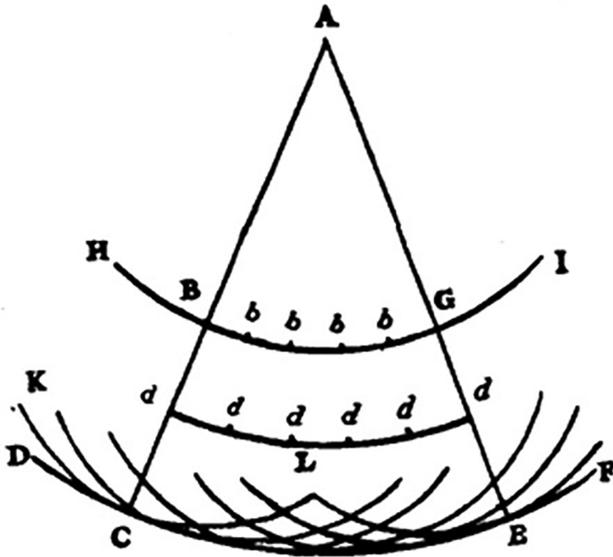


Figura 5 - Ilustração do Tratado sobre a luz utilizada para discutir o que hoje é conhecido como "princípio de Huygens". Retirada de Martins [19, p. 23].

Assim, se DCF é uma onda emanada do ponto luminoso A, que é seu centro; a partícula B, uma das que estão compreendidas na esfera DCF, produzirá sua onda particular KCL, que tocará a onda DCF em C, no mesmo momento em que a onda principal, emanada do ponto A, tenha chegado a DCF. É claro que a onda KCL tocará a onda DCF apenas no lugar C, que está na reta traçada por A e B. Da mesma forma as outras partículas compreendidas na esfera DCF, como bb, dd, etc., terão cada uma produzido sua onda. Mas cada uma dessas ondas não pode ser senão infinitamente fraca comparada à onda DCF, para cuja composição todas as outras contribuem pelas partes de suas superfícies que estão mais afastadas do centro A. [27]

A explicação dos fenômenos da refração e reflexão seria uma aplicação direta do "princípio de Huygens". Por meio dele, Huygens demonstrou a validade das leis ópticas conhecidas, estabelecendo, ao mesmo tempo, um modelo mecânico para a concepção vibracional da luz (Fig. 6).

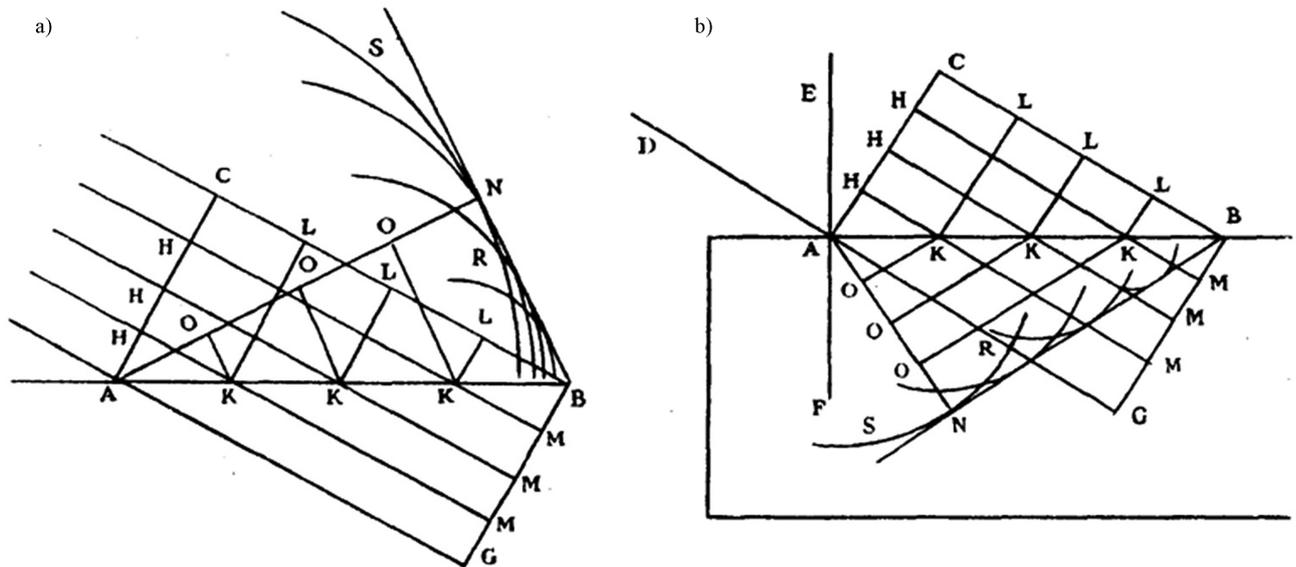


Figura 6 - Ilustrações do Tratado sobre a luz, em que Huygens explica como seu princípio de ondas secundárias pode ser utilizado para explicar a reflexão (a) e a refração (b). Retiradas de Martins [19, p. 25 e 33].

A dupla refração foi discutida no quinto e último capítulo do *Tratado*. O fenômeno desempenhou um papel fundamental na teoria sobre luz defendida por Huygens, uma vez que a explicação da refração irregular deveria concordar com seu "princípio", descrito e aplicado nos capítulos anteriores [28]. Se o "princípio de Huygens" servisse para explicar tanto a refração ordinária quanto extraordinária seria uma evidência importante para comprovar a validade e aplicabilidade de sua te-

oria, uma vez que duas refrações aparentemente sem relação uma com a outra poderiam ser enquadradas em um mesmo modelo teórico.

Huygens iniciou abordando algumas características do cristal e do fenômeno. Ele diferenciou as duas refrações no cristal, destacando a irregularidade de uma delas. Assim como Bartholinus, ele descreveu vários experimentos com o cristal e as maneiras de observar a dupla refração dos raios (Fig. 7)

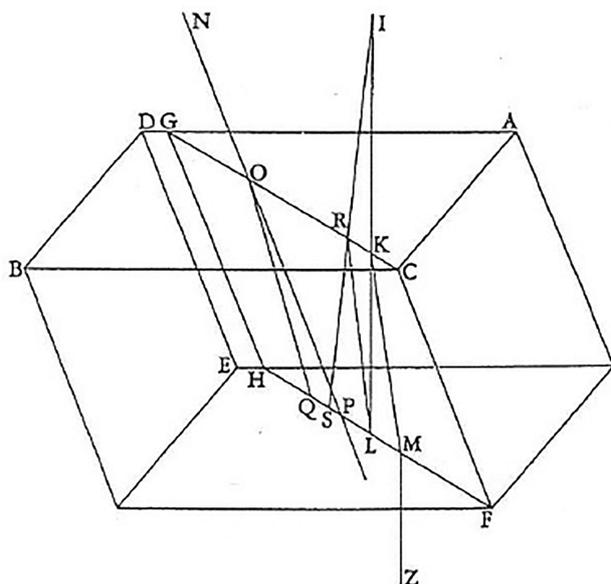


Figura 7 - Ilustração do Tratado sobre a luz, em que Huygens analisa o fenômeno da dupla refração do cristal-da-Islândia. Retirada de Martins [19, p. 49].

Nas partes seguintes, Huygens expôs sua explicação para o fenômeno. Ele parece ter concluído que o fato de uma refração não respeitar as leis conhecidas indicava que havia duas formas de emanção das ondas dentro do cristal. Enquanto a refração ordinária seria causada por ondas esféricas, a extraordinária seria causada pela propagação de ondas esferoidais pelo cristal.

Como existiam duas refrações diferentes, concebi que haviam também duas diferentes emanções de ondas de luz e que uma podia ocorrer na matéria etérea espalhada no corpo do cristal. [...] Atribui essa emanção de ondas à refração regular que se observa nessa pedra, supondo que essas ondas tivessem a forma esférica ordinária [...]. Quanto à outra emanção que deveria produzir a refração irregular, experimentei verificar o que ocorreria com ondas elípticas, ou melhor, esferoidais. Supus que elas se propagassem indiferentemente tanto na matéria etérea distribuída dentro do cristal quanto nas partículas que o compõem, conforme a última maneira pela qual expliquei a refração. [29]

Como aponta Sabra [30], Huygens supôs que as duas emanções passassem em meios diferentes. Enquanto a refração ordinária seria causada pela propagação das ondas no meio etéreo que preencheria o cristal, a extraordinária seria devido à propagação das ondas tanto no éter quanto na própria matéria do cristal. Isto provavelmente pareceu plausível a Huygens, uma vez que, se as duas se comportam de maneira distinta, devem percorrer meios distintos. Além disso, podemos supor que

ele percebeu o papel decisivo do cristal para a produção da dupla refração.

Pelo trecho anterior, nota-se que ele resolveu “experimentalmente” a consideração de ondas esferoidais para tentar explicar o fenômeno. Isso reforça a alegação de Shapiro [31], que destaca duas fases na investigação de Huygens sobre a dupla refração: primeiramente, ele deveria verificar *se* as ondas esferoidais seriam capazes de explicar a refração irregular para, em segundo lugar, investigar *como* a forma e a posição destes esferoides poderiam ser determinados. Para este autor, Huygens confrontou um pesado desafio matemático e experimental para estabelecer as características dos esferoides e suas orientações em relação ao cristal.

A partir da análise da dupla refração sofrida por um raio incidente perpendicular à superfície do cristal, Huygens concluiu que as ondas esferoidais serviriam para explicar o fenômeno.

Considerarei AB como o lugar descoberto da superfície. Como um raio perpendicular a um plano, vindo de uma luz muito distante, não é, pela teoria precedente, mais do que a incidência de uma parcela de onda paralela a esse plano, supus que a reta RC, paralela e igual a AB, fosse uma porção de onda luminosa, cujos infinitos pontos RHhC viessem encontrar a superfície AB nos pontos AKkB. Portanto, no lugar de ondas particulares hemisféricas que em um corpo de refração ordinária deveriam propagar-se de cada um desses últimos pontos – como explicamos acima ao tratar da refração – deveria surgir aqui hemisferoides, dos quais suporei que os eixos ou então os maiores diâmetros são oblíquos ao plano AB.

[Huygens analisa a propagação da onda esferoidal ilustrada na Fig. 8]

[...] E foi assim que compreendi o que me havia parecido muito difícil: como um raio perpendicular a uma superfície pode sofrer refração ao entrar no corpo transparente; pois vi que a onda RC, proveniente da abertura AB, continuava a partir de lá a propagar-se entre as paralelas NA e BQ, permanecendo no entanto ela própria sempre paralela a AB, de modo que aqui a luz não se propaga por linhas perpendiculares às suas ondas, como na refração ordinária, mas essas linhas cortam as ondas obliquamente. [32]

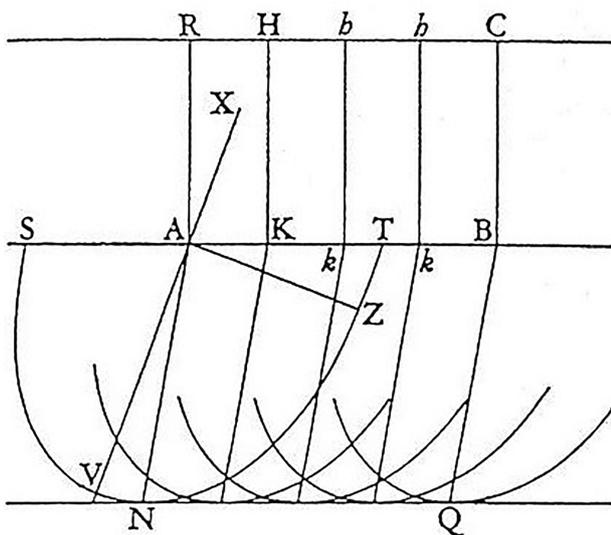


Figura 8 - Ilustração do Tratado sobre a luz mostrando a pro-

pagação de ondas esféricas pelo cristal-da-Islândia. Retirada de Martins [19, p. 55].

No caso de uma incidência oblíqua dos raios, Huygens também conseguiu adequar as ondas esféricas à explicação do fenômeno, verificando que “a demonstração disso é completamente semelhante à de que nos servimos ao explicar a refração ordinária” [33]. Além disso, percebe-se que ele assumiu a correspondência das explicações para as refrações ordinária e extraordinária como elemento importante de sua argumentação.

Na parte final de sua análise da dupla refração, Huygens comentou sobre um efeito novo, não notado por Bartholinus e descoberto por ele pouco após sua análise descrita nos trechos anteriores. Ao colocar dois cristais-da-Islândia um acima do outro, com suas seções principais paralelas entre si, Huygens percebeu que os raios ordinário e extraordinário surgidos no primeiro cristal permaneciam com este comportamento no segundo (Fig. 9).

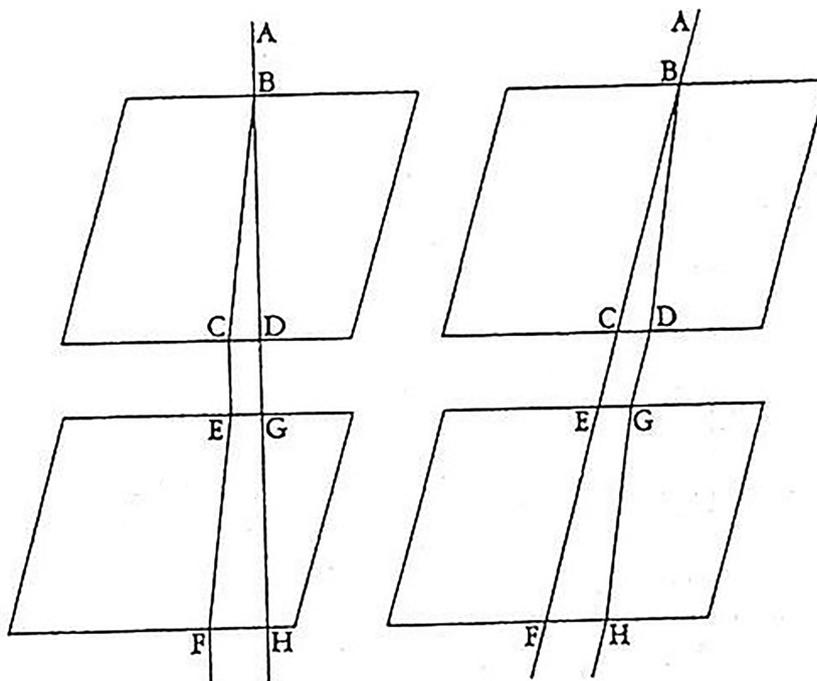


Figura 9 - Ilustração do Tratado sobre a luz utilizada por Huygens para discutir o comportamento dos raios de luz na passagem por cristais sucessivos. Retirada de Martins [19, p. 73].

Se as seções dos cristais inferiores fossem giradas a 90° em relação às seções dos cristais superiores, um fenômeno ainda mais estranho ocorria: o raio que sofreu uma refração ordinária no primeiro cristal apresentava uma refração extraordinária no segundo e vice-versa. Caso as seções fossem colocadas em outras posições aleatórias entre si, os raios ordinário e extraordinário vindos do primeiro se dividiam novamente no segundo, originando mais duas refrações.

[...] parece que somos obrigados a concluir que as ondas de luz, por haver passado pelo primeiro cristal, adquirem certa forma ou disposição pela qual, ao encontrar a estrutura do segundo cristal em certas posições, podem colocar em movimento as duas matérias diferentes que correspondem aos dois tipos de refração; e ao encontrar esse segundo cristal em uma outra

posição, elas só podem nele mover uma dessas matérias. Mas não encontrei até agora nada que me satisfaça para indicar como isso ocorre. [34]

Huygens parece ter encarado a descoberta como um grande problema a ser resolvido e adequado à sua explicação anterior, utilizando ondas esféricas e esferoidais. Ele provavelmente notou que atribuir unicamente ao cristal a causa da dupla refração não seria suficiente para explicar este novo fenômeno, sendo levado a admitir também um efeito no próprio pulso de luz.

Para Shapiro [35], a explicação de Huygens para o fenômeno da dupla refração, juntamente com sua interpretação cinemática do fenômeno, formaram uma real sustentação para a teoria vibracional da luz. Para o autor, isto fez com que essa concepção se tornasse uma alternativa viável para explicar os fenômenos ópticos conhecidos na época. Contudo, segundo Martins [36], o novo comportamento da luz na dupla refração descoberto por Huygens foi um dos principais argumentos contra sua teoria e isto só poderia ser resolvido se incluíssemos uma nova propriedade à luz, o que Newton fez em seu *Óptica*.

Os apontamentos de Shapiro e Martins e o breve estudo do modelo explicativo de Huygens levam a uma conclusão singular sobre seu trabalho: ao mesmo tempo em que sua explicação para a dupla refração representou um forte argumento a favor da concepção vibracional, visto que ela poderia ser empregada tanto para a refração ordinária quanto extraordinária, um caso particular do fenômeno contribuiu para demolir a essência de toda a argumentação construída no *Tratado* sobre a natureza vibracional da luz. Anos mais tarde, no *Óptica*, Newton buscou resolver a questão, adotando uma teoria corpuscular para a luz e contrapondo fortemente qualquer teoria vibracional para explicar a dupla refração.

4. A dupla refração no *Óptica* de Newton

A óptica ocupou a mente de Newton desde o início de sua vida acadêmica, por volta da década de 1660.

¹⁰Em português: Algumas Questões Filosóficas. O conteúdo do caderno foi publicado por McGuire e Tamny [37] e atualmente está disponível no site do The Newton Project (<http://www.newtonproject.sussex.ac.uk>).

¹¹Este ensaio também está publicado em McGuire e Tamny [37] e disponível no site do The Newton Project (<http://www.newtonproject.sussex.ac.uk>).

¹²Publicado em português em Cohen e Westfall [40].

¹³Publicado em inglês em Cohen e Schofield [41].

¹⁴Há outra tradução do *Óptica* para o português, mas incompleta. Ela foi publicada na coleção *Os Pensadores*, lançada pela editora Nova Cultural em 1987 [48]. Nessa versão, estão traduzidos os trechos correspondentes ao estudo de Newton sobre a dupla refração. Há algumas divergências com os termos utilizados na versão da EDUSP, que serão apontados à frente.

¹⁵Originalmente, Newton utilizou o termo *unusual refraction* para denominar a estranha refração do cristal-da-Íslândia no *Óptica*. Na edição em português da EDUSP, este termo foi traduzido para “refração extraordinária”. Na coleção *Os Pensadores*, o termo foi traduzido para “refração incomum” [48]. Embora a tradução mais correta seja esta última, preferi seguir o texto da EDUSP, por ser uma versão mais completa e atual. Dessa forma, assim como no caso de Huygens e o uso da palavra “onda” (ver nota 7), citarei os trechos conforme eles estão descritos na versão utilizada, sem alterações. No entanto, o leitor deve estar atento para esta questão, evitando uma interpretação anacrônica da análise de Newton.

Em seu caderno de anotações – intitulado *Quæstiones Quædam Philosophicæ*¹⁰ – ele já se dedicava a entender os fenômenos da luz e das cores, produzindo seus pensamentos iniciais sobre o assunto. Nos anos seguintes, Newton escreveu um ensaio específico sobre as cores (“Das Cores”¹¹) e em 1672 publicou seu primeiro artigo, a “Nova teoria sobre luz e cores” [38], provocando uma sucessiva onda de críticas por parte de seus coetâneos, tais como Hooke e Huygens [39]. Em 1675, ele escreveu outros dois textos, a “Hipótese da luz”¹² e um sem título, mas conhecido como “Discurso das Observações”¹³, que marcam o início de um hiato de quase trinta anos de estudos até o *Óptica*, sua principal obra sobre o tema, publicada pela primeira vez em 1704.

Nos textos escritos antes do *Óptica*, não há menção sobre o fenômeno da dupla refração. Além disso, não se sabe ao certo quando Newton começou a estudar o fenômeno, apenas que em meados de 1689 ele já havia analisado a estranha refração do cristal-da-Íslândia e discutiu o fenômeno em uma reunião da *Royal Society de Londres*, na qual Huygens estava presente [8].

No *Óptica*, Newton reservou às “Questões” do Livro III a discussão acerca do fenômeno. As “Questões” compõem uma das mais interessantes partes de seu livro, uma vez que nelas ele especulou abertamente sobre vários temas controversos e não estudados completamente por ele. Por meio de afirmações em forma de perguntas, ele buscou defender implicitamente várias ideias que ainda não haviam sido formalizadas, ou seja, que ainda guardavam um caráter hipotético inaceitável para seu método de pesquisa sobre o mundo natural, embora muitas hipóteses tenham exercido papel fundamental em algumas de suas concepções sobre a luz [42, 43, 44]. Isso fez com que Newton ficasse livre para debater seu modelo explicativo para o fenômeno, mas dentro de suas próprias regras metodológicas, este modelo não poderia ser considerado senão uma hipótese.

Ao longo das edições do *Óptica*, a quantidade de “Questões” e seu conteúdo passaram por algumas mudanças [45]. As “Questões” referentes à dupla refração apareceram na edição em latim do livro, publicada em 1706. Não se sabe ao certo por que Newton não incluiu a análise desse fenômeno na edição original de 1704 [46], uma vez que ele já o conhecia pelo menos desde 1689.

Na edição em português do livro [47], utilizada nessa análise,¹⁴ o fenômeno é tratado nas questões 25 e 26 e mencionado nas questões 28 e 29.¹⁵ Discutirei especificamente o conteúdo das duas primeiras, fazendo referências às outras duas, quando oportuno.

Para Newton, a dupla refração seria ocasionada por uma propriedade original e imutável da luz, os “lados”. Na Questão 25 do Livro III, ele abordou mais diretamente esse ponto.

Não há outras propriedades originais dos raios de luz, além daquelas já descritas? Exemplo de outra propriedade original, temo-lo na refração do cristal-da-islândia, descrita primeiro por Erasmus Bartholinus e depois, com mais exatidão, por Huygens em seu livro *De la Lumière* [Tratado sobre a Luz]. [50]

Essa foi uma refutação imediata ao modelo de Huygens, que pregava a modificação dos raios de luz pelo cristal, ou seja, enquanto este afirmava que a luz *sofria uma transformação e essa originava o fenômeno*, segundo Newton, a tendência para que a dupla refração ocorresse *já estava na própria luz*. A dupla refração seria uma evidência contra as concepções vibracionais, que sugeriam a modificação da luz de alguma forma pelo corpo refrator.

Nos trechos seguintes da questão 25, Newton prosseguiu descrevendo as características gerais do cristal, assim como fizeram Bartholinus e Huygens, e identificou as duas refrações observadas, ordinária e extraordinária. Mais adiante, ele apresentou uma regra para se traçar a trajetória do raio extraordinário (Fig. 10).

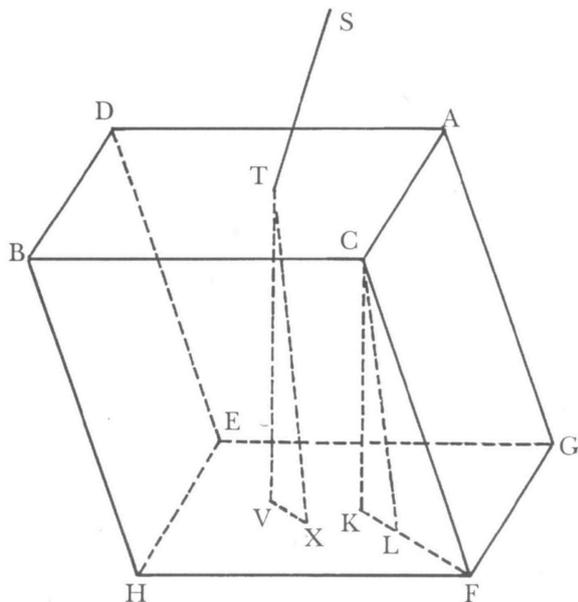


Figura 10 - Ilustração da Óptica utilizada por Newton para mostrar sua regra para se traçar a trajetória do raio extraordinário. Retirada de Newton [47, p. 261].

Seja ADBC a superfície refratora do cristal, C o maior ângulo sólido nessa superfície, GEHF a superfície oposta e CK uma perpendicular traçada sobre essa superfície. Essa perpendicular forma com a borda do cristal CF um ângulo de $19^{\circ} 3'$. Ligue KF, e, nela, tome KL, de modo que o ângulo KCL seja $6^{\circ} 40'$ e o ângulo LCF $12^{\circ} 23'$. E, se ST representa qualquer feixe de luz que incide em T em qualquer ângulo sobre a superfície refratora ADBC, seja TV o feixe refratado determinado pela porção dada dos senos 5 para 3, de acordo com a regra usual da óptica. Trace VX paralelo e igual a KL. Trace-a desde V da mesma forma que L é traçada desde K; e, ao ligar TX, essa linha TX será o outro feixe refratado levado de T até X pela refração extraordinária. [51]

A regra descrita por Newton não é correta [52]. Provavelmente, ele procurou estabelecer uma explicação mais fácil que os esferoides de Huygens – cujo modelo para a refração extraordinária está correto – com intuito de mostrar que a ideia de que o fenômeno seria uma manifestação de uma propriedade original da luz levava a teorias mais simples que os complexos argumentos da concepção vibracional.

Nos trechos seguintes da questão 25, Newton abordou o fenômeno descoberto por Huygens, a respeito do fato dos raios ordinários e extraordinários manterem seus padrões de refração quando incidiam sobre a superfície de outros cristais-da-Islândia colocados paralelamente abaixo deles.

Há, portanto, uma diferença original nos raios de luz por meio da qual alguns raios nessa experiência são constantemente refratados da maneira usual e outros da maneira extraordinária; pois se a diferença não fosse original, mas resultasse de novas modificações impressas nos raios em sua primeira refração, ela seria alterada por novas modificações nas três refrações seguintes, ao passo que não sofre alteração, mas é constante e tem o mesmo efeito sobre os raios em todas as refrações. [53].

O trecho apresenta uma crítica explícita à concepção vibracional da luz e indiretamente à própria explicação de Huygens. Como essa concepção pressupõe que a luz é resultado da propagação de um movimento por um meio – muitas vezes, o meio etéreo –, os fenômenos ópticos seriam explicados por modificações dos corpos sobre a luz. Para Newton, o fato do raio de luz manter um padrão de comportamento passando de um corpo a outro seria uma evidência contrária a essa concepção vibracional e só poderia ser explicado pensando que a luz seria dotada de características próprias e não modificáveis com a passagem pelos corpos refratores.

A crítica à concepção vibracional da luz foi mais explícita na Questão 28, em que ele perguntou: “Não são errôneas todas as hipóteses segundo as quais a luz consistiria em pressão ou movimento propagados através de um meio fluido?” [54]. Na mesma questão, Newton aproveitou o discurso de Huygens sobre sua incapacidade de compreender o fenômeno recém-descoberto para dizer que este seria uma evidência de que realmente seu modelo vibracional para a luz não poderia dar conta da dupla refração.

Até aqui ninguém tentou (que eu saiba) explicar a refração extraordinária do cristal-da-islândia pela pressão ou movimento propagados, exceto Huygens, que para esse fim imaginou dois meios vibratórios distintos dentro desse cristal. Mas, quando examinou as refrações nos dois pedaços sucessivos desse cristal e encontrou-as tal como está mencionado acima, confessou-se embaraçado para explicá-las. [...] não pôde dizer que modificações poderiam ser essas, nem imaginar qualquer coisa satisfatória sobre esse ponto. [55]

A dupla refração seria, assim, explicada pelo advento de uma propriedade nova da luz, os seus “lados”. Na questão 26 do *Óptica*, ele perguntou:

“Não têm os raios de luz vários lados, dotados de várias propriedades originais?” [53]

De acordo com Newton, não haveria dois tipos de raios, mas duas possíveis orientações dos “lados” dos raios em relação ao cristal. É difícil saber exatamente como Newton pensou a representação visual destes “lados”,¹⁶ mas é possível delinear alguns parâmetros que facilitem o entendimento de sua explicação.

Os raios de luz teriam quatro lados ou quatro quartos, dois fazendo com que o raio fosse refratado ordinariamente e dois causadores da refração extraordinária. Cada um desses “lados” responsáveis pelo mesmo tipo de refração seria oposto ao outro. Para tentar compreender a argumentação de Newton, podemos pensar que a seção reta de um raio de luz seja um quadrado, conforme a Fig. 11. Cada par de “lados” opostos faria com que o raio tendesse a sofrer um tipo de refração.

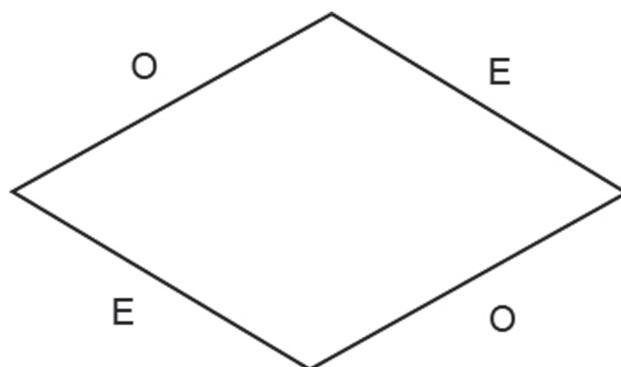


Figura 11 - Possível representação dos lados da luz. Os lados indicados com a letra “O” fariam com que o raio tendesse a sofrer uma refração ordinária. Os lados de letra “E”, por sua vez, ocasionariam uma refração extraordinária.

Os “lados” estariam nos raios de luz desde sua primeira emissão dos corpos luminosos, ou seja, essa não seria uma propriedade *adquirida* ao entrar no corpo refrator. Para ele, o fato de um raio ser refratado ordinariamente no primeiro cristal e extraordinariamente em segundo cristal cujo plano de refração perpendicular está a 90° em relação ao primeiro seria explicado pela posição dos seus lados quanto aos cristais.

Se os lados dos raios são posicionados da mesma maneira em relação a ambos os cristais, ele é refratado da mesma maneira em ambos; mas se o lado do raio voltado para o lado da refração extraordinária do primeiro cristal¹⁷ estiver a 90 graus do lado do mesmo raio voltado para o lado da refração extraordinária do segundo cristal [...], o raio será refratado de maneiras diversas nos diversos cristais. [59]

No trecho em destaque da citação, vemos que Newton também pensou na existência de um lado de refração extraordinária no cristal. O raio seria refratado de maneira ordinária ou extraordinária de acordo com a orientação dos seus lados em relação a este lado de refração extraordinária do cristal. Curiosamente, não há menção sobre a existência de um lado de refração ordinária do cristal.

Para facilitar o entendimento do possível raciocínio de Newton, podemos imaginar este como um cubo, sendo duas de suas faces os lados da refração extraordinária (Fig. 12).

¹⁶Edmund Whittaker, na introdução da edição em inglês do *Óptica*, publicada pela Dover, ofereceu uma possível representação para os lados da luz. Segundo ele, “um raio obtido por dupla refração difere de um raio de luz ordinário da mesma maneira que uma haste longa cuja seção reta é um retângulo difere de uma haste longa cuja seção reta é um círculo: em outras palavras, as propriedades de um raio de luz ordinário são as mesmas com respeito a todas as direções em ângulos retos a sua direção de propagação, enquanto que um raio obtido por dupla refração tem propriedades relacionadas a direções especiais em ângulos retos a sua própria direção” [56].

¹⁷Na edição em inglês do *Óptica*, este trecho em negrito está escrito da seguinte forma: “But if that side of the ray which looks towards the coast of unusual refraction of the first crystal [...]” [57]. É possível observar que os lados dos raios são denominados *sides* e o lado do cristal chamado de *coast*. Na edição em português não há essa diferenciação e ambos os termos foram traduzidos como *lados*. Na tradução em português da coleção *Os Pensadores*, foi utilizado o termo “costa” para denominar o lado do cristal [58]. Por meio de uma análise da etimologia das palavras *coast* e *side* no Online Etymology Dictionary [http://www.etymonline.com], concluí que as duas palavras tem significados parecidos e que a tradução de ambas por *lados* é adequada. Contudo, o fato de Newton utilizar dois termos para os lados dos raios e do cristal indica, provavelmente, que ele não acreditava que os dois tinham as mesmas características.

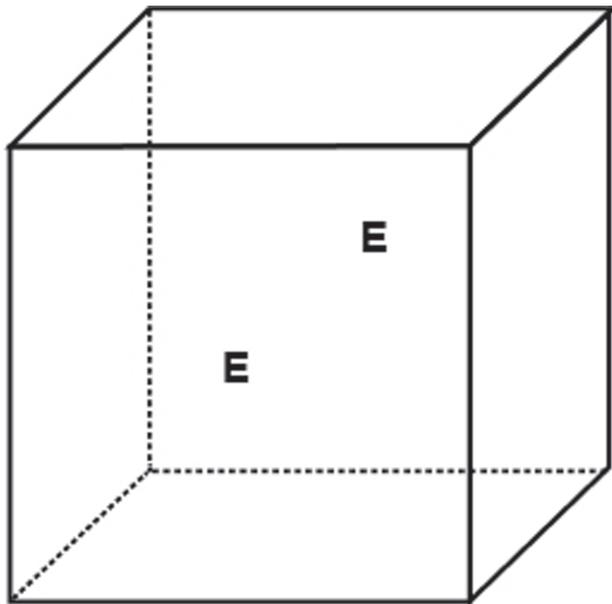


Figura 12 - Os lados de refração extraordinária do cristal-da-Islândia.

Newton comentou em seguida sobre como ocorria a dupla refração dos raios no cristal. Aparentemente, os raios incidiriam na superfície do cristal com os lados orientados aleatoriamente em relação ao seu lado de refração extraordinária. Os lados dos raios tenderiam, assim, a se orientar em direção ao lado de refração extraordinária do cristal. Dependendo de qual lado do raio se orientava, um tipo de refração ocorria.

Portanto, todo raio pode ser considerado como tendo quatro lados ou quatro quartos, dois dos quais, opostos um ao outro, fazem com que o raio tenda a ser refratado da maneira extraordinária, na medida em que ambos são girados em direção aos lados da refração extraordinária; e os outros dois, sempre que ambos são girados em direção ao lado da refração extraordinária, não fazem com que ele tenda a ser refratado de outra maneira que não a usual. Os dois primeiros podem, portanto, ser chamados de lados da refração extraordinária. [59]

Dessa forma, Newton estabeleceu ser possível girar os lados dos raios, de acordo com o lado do cristal. Podemos assumir que em um fecho de luz incidente sobre a superfície do cristal-da-Islândia houvesse raios cujos lados estivessem orientados aleatoriamente. Alguns teriam seus lados de refração extraordinária orientados em direção ao lado de refração extraordinária do cristal, ocasionando esse tipo de refração, tal como o raio 1 da Fig. 13. Outros, com seus lados de refração ordinária orientados em direção ao lado de refração extraordinária do cristal, sofreriam a refração comum, tal como o raio 2 da Fig. 13.

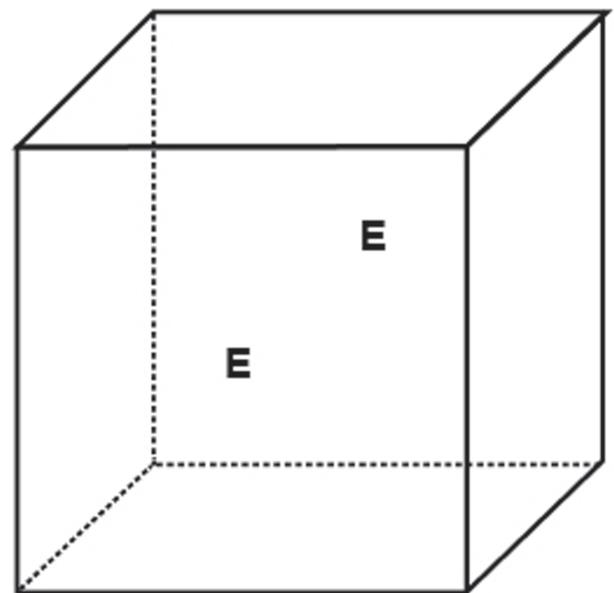
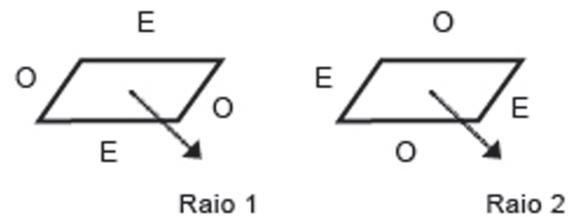


Figura 13 - Dois raios de luz incidindo sobre um cristal-da-Islândia. A orientação de seus lados em relação ao lado da refração extraordinária no cristal determina qual refração ele sofre.

O padrão de refração mantido pelos raios ao atravessar a superfície de dois cristais-da-Islândia colocados um diretamente abaixo do outro seria uma evidência de que os lados existiriam e seriam uma propriedade original da luz e que haveria uma relação entre eles e o lado do cristal.

E, como os raios apresentavam essas disposições antes de incidir sobre a segunda, terceira e quarta superfície dos dois cristais e não sofreram alteração (até onde se pode observar) pela refração dos raios ao passar através dessas superfícies, e os raios foram refratados pelas mesmas leis em todas as quatro superfícies, parece que essas disposições se encontravam originalmente nos raios, não tendo sofrido alteração pela primeira refração, e que em virtude dessas disposições os raios foram refratados ao incidir sobre a primeira superfície do primeiro cristal, alguns deles de maneira usual, outros da maneira extraordinária, segundo seus lados de refração extraordinária estavam virados para o lado da refração extraordinária desse cristal ou se apresentavam obliquamente em relação a ele. [59]

A orientação dos lados do raio em relação ao lado da refração extraordinária do cristal em sua passagem pela primeira superfície seria mantida nas seguintes, consequentemente, o raio sofreria o mesmo tipo de refração nos outros cristais.

Por meio desse modelo, também era possível explicar por que o giro em 90° do plano refrator do segundo cristal em relação ao primeiro ocasionava a mudança no padrão da refração dos raios, sem o surgimento de uma nova dupla refração. Nesse caso, como os lados do cristal foram invertidos, ocorreria também uma alteração na refração sofrida por cada raio (Fig. 14)

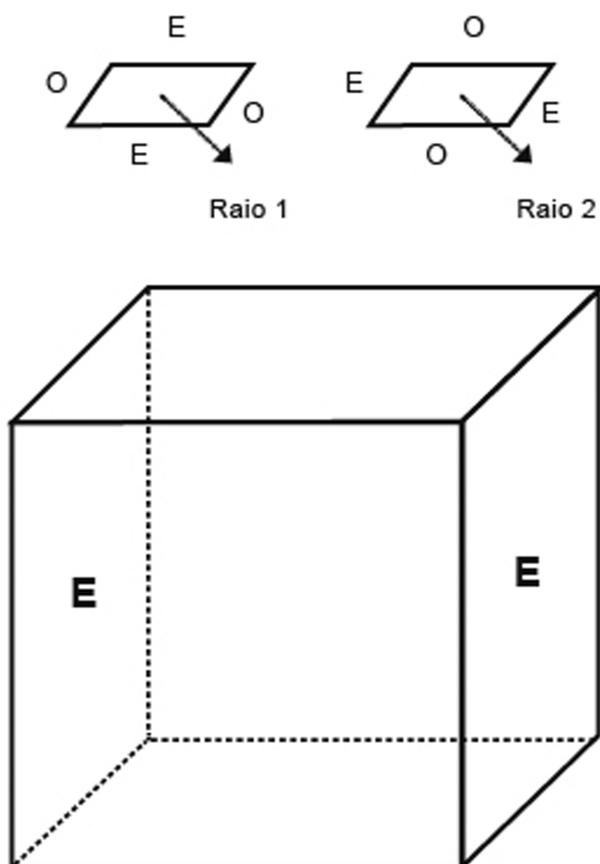


Figura 14 - Com um segundo cristal em uma nova orientação, as refrações sofridas pelos raios serão diferentes. O raio 1 sofrerá uma refração ordinária, enquanto o raio 2 uma refração extraordinária.

No caso do plano refrator do segundo cristal ser girado a outros ângulos, novamente teríamos uma dupla refração de todos os raios,

uma vez que seus lados tenderiam outra vez a se orientar em relação ao lado da refração extraordinária do cristal.

Se os planos de refração perpendicular dos dois cristais não forem nem paralelos nem perpendiculares um ao outro, mas contiverem um ângulo agudo, os dois feixes de luz que saírem do primeiro cristal serão cada qual divididos em mais dois feixes ao incidir

sobre o segundo cristal. Pois nesse caso, os raios em cada um dos feixes terão, uns seus lados da refração extraordinária, outros os seus lados voltados para o lado da refração extraordinária do segundo cristal. [60].

A atribuição de lados à luz tornaria a explicação da dupla refração aparentemente mais simples e objetiva. Não seria necessário, segundo Newton, pensar que o cristal alteraria características dos raios luminosos; bastaria assumir que existiria uma propriedade original da luz que seria responsável pelo fenômeno e que ela teria algum tipo de associação com as propriedades do cristal. A partir disso, Newton soube explicar não somente a dupla refração em si, mas também o fenômeno descoberto por Huygens com o uso de dois cristais-da-Islândia.

Newton também utilizou a dupla refração para defender uma concepção corpuscular para a luz. A ideia de que a luz tem quatro lados ou quatro quartos implica, quase necessariamente, na suposição de ela tem uma forma e dimensão definidas. Em uma concepção vibracional ou ondulatória, não podemos imaginar *lados opostos um ao outro* ou raios de luz sendo *girados*, pois esses são características e efeitos de corpos materiais. Além disso, o fato da luz ter uma *propriedade inata e imutável* não poderia ser explicado se a considerássemos uma vibração ou onda, uma vez que essas podem ter características modificadas quando passam de um meio para outro. Na Questão 29, Newton perguntou:

Os raios de luz não são corpos minúsculos emitidos pelas substâncias que brilham? [61]

Na mesma questão, Newton associou essa característica material à luz a um possível motivo para que os lados da luz girassem a fim de se orientarem com o lado da refração extraordinária do cristal. Segundo ele, os lados dos raios e do cristal pareciam possuir uma virtude atrativa entre si, que resultaria na orientação dos primeiros em relação ao segundo.

E, desde que o cristal, por sua disposição ou virtude, não age sobre os raios, a não ser quando um dos seus lados de refração extraordinária se volta para esse lado, isso prova que há uma virtude ou disposição nesses lados dos raios que respondem e simpatizam com aquela virtude ou disposição do cristal como os polos de dois ímãs respondem um ao outro. [...] Não digo que essa virtude seja magnética: ela parece ser de outro tipo. Digo apenas que, o que quer que ela seja, é difícil conceber como os raios de luz, a não ser que sejam corpos, podem ter uma virtude permanente em dois de seus

lados e não nos outros, e isso sem ter nenhuma relação com suas posições relativas ao espaço ou meio através do qual eles passam. [62]

A associação que Newton fez entre a dupla refração e os efeitos mútuos dos polos de imãs deu origem ao termo “polarização da luz”, até hoje utilizado [63]. É interessante que ele reforçou a ideia de que não seria possível compreender o fenômeno sem pensar na luz como corpos com poderes atrativos, interagindo com o lado da refração extraordinária do cristal.

A dupla refração foi tratada por Newton nas partes finais do *Óptica*. Assim como Huygens, ele inicialmente discutiu características básicas do cristal-da-Islândia e, em seguida, apresentou uma regra para traçar o raio extraordinário, considerada errada atualmente. Para ele, o fenômeno seria uma evidência terminante de que a luz possuiria mais uma propriedade original, os lados. Por meio dessa ideia, ele foi capaz de explicar os diversos comportamentos dos raios ao passarem por cristais sucessivos e, ao mesmo tempo, criticar a concepção vibracional e defender a materialidade da luz.

5. Alguns comentários sobre o conceito de “lados da luz” de Newton

Os lados dos raios luminosos não foram as únicas propriedades originais e imutáveis da luz discutidas por Newton no *Óptica*. Nos livros I e II, ele propôs outras propriedades, tais como as cores [64] e os estados de fácil transmissão e fácil reflexão [7, 42], construindo sua argumentação com base em diversos experimentos e observações. Newton dedicou quase inteiramente o conteúdo dos livros ao estudo destes temas. Porém, ele foi bem mais sucinto para a dupla refração. Foi apresentada apenas uma discussão essencialmente experimental – a que tratou da regra para traçar o raio extraordinário –, sendo o restante formado por argumentos teóricos sobre o comportamento da luz baseados no conceito de lados. As razões para essa exposição superficial sobre o fenômeno podem ser suscitadas a partir de uma breve investigação da elaboração do *Óptica* no final do século XVII.

O conteúdo e a estrutura do *Óptica* passaram por modificações significativas até sua primeira publicação em 1704. Segundo o próprio Newton, parte de seu conteúdo começou a ser escrita em meados de 1675, “a pedido de alguns cavaleiros da Royal Society” [65]. Possivelmente, ele se referiu aos textos “Hipótese da luz” e “Discurso das observações”, enviados para a sociedade naquele ano. Após esse período, Newton teria retornado aos estudos em óptica apenas no final da década de 1680, logo após a publicação dos *Principia* [66].

O plano inicial de Newton previa a elaboração de quatro livros para o *Óptica*, e não três, como foi publicado. O quarto e último livro seria destinado ao tratamento dinâmico dos fenômenos ópticos, em uma espécie de união entre a mecânica e a óptica newtoniana [67, 68]. Segundo Westfall [69], o plano não se concretizou e Newton acabou organizando a obra na forma como conhecemos atualmente. O conteúdo desse suposto quarto livro acabou sendo distribuído em várias partes do *Óptica*, mas especialmente na Questão 31,¹⁸ a última e mais longa do texto [71].

Certamente, Newton não gostaria de ter encerrado o *Óptica* com questões e provavelmente essa foi uma decisão tomada após seu plano inicial não ter tido êxito [72]. É razoável supor que Newton pretendesse incluir a dupla refração no cerne da discussão sobre a existência de forças entre luz e matéria, uma vez que ele conhecia o fenômeno desde pelo menos o ano de 1689. A análise de sua argumentação evidencia que ele considerava o fenômeno exclusivamente a partir de uma concepção corpuscular para a luz. Porém, dado que a ideia de completar o *Óptica* com um tratamento mecânico para a luz não foi à frente, a análise da dupla refração também não deve ter prosseguido, embora o conceito de lados pudesse tornar-se um relevante argumento a favor da materialidade da luz.

À parte dessas suposições e apreciando apenas o que Newton escreveu no *Óptica*, também cabem alguns comentários. Os argumentos apresentados são, em si, obscuros, não permitindo uma visualização mais precisa de como ele entendia o conceito de lados. A inexistência de figuras ao longo de sua argumentação nas questões 25 e 26 dificulta o entendimento de sua argumentação. A única figura apresentada referiu-se à apresentação de sua regra (errada) para traçar os raios ordinários e extraordinários.

Nas discussões precedentes, busquei criar uma representação visual tanto para os lados dos raios quanto para o lado da refração extraordinária do cristal, mas certamente há limitações. Outras representações diferentes podem ser feitas, tais como a colocada por Whittaker (nota 16), mas como Newton não detalhou suas ideias, qualquer uma delas será limitada.

Além disso, a explicação por meio do conceito de lados da luz é deficiente em relação à explicação de Huygens. Como aponta Hall [73], os lados parecem uma “analogia mecânica imperfeita” com os polos de um ímã, se a compararmos com o estudo sofisticado de Huygens no *Tratado sobre a Luz*. Este último investiu em uma complexa argumentação geométrica para descrever o fenômeno e suas principais características, enquanto Newton utilizou poucos parágrafos para fazer o mesmo.

A crítica que Newton fez à explicação do fenômeno

¹⁸Nesta questão, Newton perguntou no início: “Não têm as pequenas partículas dos corpos certos poderes, virtudes ou forças por meio dos quais elas agem a distância não apenas sobre os raios de luz, refletindo-os, refratando-os e inflectindo-os, mas também umas sobre as outras, produzindo grande parte dos fenômenos da natureza?” [70].

por meio de uma concepção vibracional também é limitada. Segundo ele, a manutenção do padrão de refração dos raios de um cristal para outro seria uma evidência de que a luz não seria uma vibração, uma vez que seria modificada sucessivamente pelos cristais. Contudo, pode-se pensar que o cristal imprime uma modificação na luz na sua primeira incidência e *esta se mantém nas passagens sucessivas por outros cristais*.¹⁹

Por fim, mesmo que Newton tenha rejeitado uma concepção vibracional por ela supor que os raios seriam modificados pelo cristal, ele pareceu notar que este último tinha um papel fundamental no fenômeno. O fato dos lados da luz serem *girados* em direção aos lados do cristal – assim como os polos de um ímã se orientam em relação aos polos de outro ímã – implica que o cristal age efetivamente sobre o raio. Embora seja perfeitamente plausível supor, de acordo com as concepções de Newton, a existência dos lados desde sua primeira emissão do corpo luminoso, a dupla refração só ocorreria por conta de uma interação do raio com o cristal que resulta em uma situação favorável ou não à dupla refração.

6. Conclusão

No final do século XVII, Newton tomou conhecimento de um estranho fenômeno descoberto por Bartholinus, a dupla refração da luz. Provocada pelo cristal-da-Isândia, a estranha refração não conseguia ser explicada segundo as leis conhecidas na época. No mesmo período, Huygens dedicou-se a estudar o fenômeno, apresentando um complexo modelo baseado em esferoides para explicá-lo em seu *Tratado sobre a Luz*, publicado em 1690.

Newton abordou o fenômeno nas questões 25 e 26 do *Óptica*, mencionando-o em outras subsequentes. Sua abordagem diferenciou-se significativamente de Huygens, pois não só apresentou uma proposta mais simples, como também a utilizou para defender uma concepção corpuscular para a luz. Embora o conceito de lados da luz tenha sido logo esquecido pelos seus seguidores do século XVIII [75], ainda assim, a menção de que o fenômeno seria semelhante à orientação de polos de ímãs uns em relação aos outros perdurou, fazendo com que até hoje denominemos a dupla refração como um caso de polarização da luz.

O estudo apresentado buscou analisar em detalhes o conceito de lados da luz que Newton elaborou para explicar a dupla refração. Embora seus estudos sobre a heterogeneidade da luz branca e seus experimentos com prismas sejam os mais conhecidos por acadêmicos e educadores, sua principal obra sobre o tema, o *Óptica*, contém discussões sobre muitos outros fenômenos. A análise destas ideias pode mostrar aspectos da óptica newtoniana ainda pouco estudados, sendo subsídios

para compreendermos mais claramente os estudos sobre luz e cores de Newton e o próprio contexto de sua época.

7. Agradecimentos

Agradeço aos pareceristas pelas sugestões colocadas e à Prof^a. Cibelle Celestino Silva (IFSC-USP) pela orientação em uma versão inicial deste trabalho, realizada em 2003. Por fim, agradeço ao auxílio de Barbara B.A. Forato com as Figs. de 11 a 14.

Referências

- [1] P. Fara, *Newton – The Making of Genius* (Columbia University Press, New York, 2002).
- [2] G.N. Cantor, *Optics After Newton – Theories of Light in Britain and Ireland 1704-1840* (Manchester University Press, Manchester, 1983).
- [3] C.C. Silva e B.A. Moura, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 1602, 2008.
- [4] J.Z. Buchwald & I.B. Cohen, *Isaac Newton's Natural Philosophy* (MIT Press, Cambridge, 2001).
- [5] T.C.M. Forato, in: *Estudos de História e Filosofia das Ciências: Subsídios para Aplicação no Ensino*, editado por C.C. Silva (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- [6] J.E. McGuire and P.M. Rattansi, *Notes and Records of the Royal Society of London* **21**, p. 108-43 (1986).
- [7] B.A. Moura e C.C. Silva, in: *Filosofia e História da Ciência no Cone Sul: Seleção dos Trabalhos do 5º Encontro*, editado por R.A. Martins, C.C. Silva, J.M.H. Ferreira e L.A.-C.P. Martins (Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul, Campinas, 2008).
- [8] A.E. Shapiro, *Notes and Records of the Royal Society of London* **43**, 223 (1989).
- [9] W.F. Magie, *A Source Book in Physics* (Harvard University Press, Cambridge, 1963).
- [10] J.A. Lohne, *Centaurus*, **21**, p. 106-48 (1977).
- [11] D. Halliday, R. Resnick e K.S. Krane, *Física 4* (LTC, Rio de Janeiro, 1996), p. 115-118.
- [12] J.A. Lohne, op. cit., p. 106-7.
- [13] J.A. Lohne, op. cit., p. 109.
- [14] J.A. Lohne, op. cit., p. 113.
- [15] J.A. Lohne, op. cit., p. 115.
- [16] J.A. Lohne, op. cit., p. 129.
- [17] J.A. Lohne, op. cit., p. 145.
- [18] A.E. Shapiro, *Archives for History of Exact Sciences*, **11**, 240 (1973).
- [19] R.A. Martins, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, suplemento 4, p. 1-99 (1986).
- [20] A.E. Shapiro, op. cit. (1973).

¹⁹Um argumento semelhante foi discutido por Sabra [74], sobre o *experimentum crucis* de Newton em sua “Nova teoria sobre luz e cores” (1672).

- [21] C. Hakfoort, *Optics in the Age of Euler* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995)
- [22] F.W.O. Silva, Revista Brasileira de Ensino de Física **29**, p. 149-59 (2007).
- [23] S. Krapas, G.R.P.C. Queiroz, D. Uzêda, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **28**, p. 123-51 (2011).
- [24] A.I. Sabra, *Theories of Light from Descartes to Newton* (Cambridge University Press, Cambridge, 1981)
- [25] R.A. Martins, op. cit., p. 22, nota. 12.
- [26] A.E. Shapiro, op. cit., p. 224 (1973).
- [27] R.A. Martins, op. cit., p. 22.
- [28] A.E. Shapiro, op. cit., p. 237 (1973).
- [29] R.A. Martins, op. cit., p. 53.
- [30] A.I. Sabra, op. cit., p. 224
- [31] A.E. Shapiro, op. cit., p. 238-9 (1973).
- [32] R.A. Martins, op. cit., p. 54-6.
- [33] R.A. Martins, op. cit., p. 57-8.
- [34] R.A. Martins, op. cit., p. 74.
- [35] A.E. Shapiro, op. cit., p. 243-4 (1973).
- [36] R.A. Martins, op. cit., p. 74, nota 40.
- [37] J.E. McGuire & M. Tamny, *Certain Philosophical Questions: Newton's Trinity Notebook* (Cambridge University Press, Cambridge, 1983).
- [38] C.C. Silva e R.A. Martins, Revista Brasileira de Ensino de Física **18**, 313 (1996).
- [39] C.C. Silva e R.A. Martins, in: Atas do V Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física, Belo Horizonte-MG, p. 230-7 (1997).
- [40] I.B. Cohen e R.S. Westfall, *Newton – Textos, Antecedentes e Comentários* (EdUERJ/Contraponto, Rio de Janeiro, 2002).
- [41] I.B. Cohen and R.E. Schofield, *Isaac Newton's Papers and Letters on Natural Philosophy* (Harvard University Press, Cambridge, 1978).
- [42] B.A. Moura; C.C. Silva, Episteme **27**, p. 1-26 (2008).
- [43] A.E. Shapiro, in: *The Cambridge Companion to Newton*, editado por I.B. Cohen and G.E. Smith (Cambridge University Press, Cambridge, 2002).
- [44] P.J. Chaudhury, Philosophy and Phenomenological Research **22**, p. 344-53 (1962).
- [45] B.A Moura, *A Aceitação da Óptica Newtoniana no Século XVIII: Subsídios Para Discutir a Natureza da Ciência no Ensino*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, p. 44-8.
- [46] A.R. Hall, *All Was Light – An Introduction to Newton's Opticks* (Clarendon Press, Oxford, 1993), p. 131.
- [47] I. Newton, *Óptica* (EDUSP, São Paulo, 2002).
- [48] G. Galilei, *O Ensaiador. I. Newton, Princípios Matemáticos; Óptica; O Peso e o Equilíbrio dos Fluidos* (Nova Cultural, São Paulo, 1987).
- [49] G. Galilei. I. Newton, op. cit., p. 181.
- [50] I. Newton, op. cit., p. 260-1 (2002).
- [51] I. Newton, op. cit., p. 262 (2002).
- [52] I. Newton, op. cit., p. 262, nota 109 (2002).
- [53] I. Newton, op. cit., p. 263 (2002).
- [54] I. Newton, op. cit., p. 265 (2002).
- [55] I. Newton, op. cit., p. 266-7 (2002).
- [56] I. Newton, *Opticks* (Dover Publications, New York, 1979) , p. lxxv.
- [57] I. Newton, op. cit., p. 359 (1979).
- [58] G. Galilei. I. Newton, op. cit., p. 183.
- [59] I. Newton, op. cit., p. 264 (2002).
- [60] I. Newton, op. cit., p. 265 (2002).
- [61] I. Newton, op. cit., p. 271 (2002).
- [62] I. Newton, op. cit., p. 273 (2002).
- [63] I. Newton, op. cit., p. lxxvi (1979).
- [64] C.C. Silva, *A Teoria das Cores de Newton: Um Estudo Crítico do Livro I do Opticks*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [65] I. Newton, op. cit., p. 31 (2002).
- [66] R.S. Westfall, *Never at Rest, A Biography of Isaac Newton* (Cambridge University Press, Cambridge, 1980), p. 520.
- [67] A.R. Hall, op. cit., p. 87.
- [68] R.S. Westfall, op. cit., p. 521.
- [69] R.S. Westfall, op. cit., p. 523.
- [70] I. Newton, op. cit., p. 274 (2002).
- [71] A.R. Hall, op. cit., p. 89.
- [72] A.R. Hall, op. cit., p. 127.
- [73] A.R. Hall, op. cit., p. 132.
- [74] A.I. Sabra, op. cit., p. 295
- [75] A.R. Hall, op. cit., p. 132-3.