

A “Nova Teoria sobre Luz e Cores” de Isaac Newton: uma Tradução Comentada

(Isaac Newton's “New theory about light and colours”: a commented translation)

Cibelle Celestino Silva e Roberto de Andrade Martins*

Grupo de História e Teoria da Ciência,
Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia,
Instituto de Física “Gleb Wataghin”, UNICAMP,
Caixa Postal 6165, 13081-970 Campinas, SP

Trabalho recebido em 16 de maio de 1996

Este artigo apresenta e discute o primeiro trabalho publicado por Newton descrevendo sua concepção sobre a natureza da luz branca e das cores. O trabalho de Newton foi impresso nas *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* em 1672. As idéias de Newton tiveram grande repercussão e levaram a uma intensa discussão, pela sua grande novidade e complexidade. O estudo do artigo original de Newton é útil para o ensino de óptica, permitindo verificar dificuldades conceituais associadas à teoria das cores.

Abstract

This article presents and discusses Newton's first published work on the nature of white light and colours. Newton's paper was published in the *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* in 1672. Newton's ideas had a strong impact and led to an intense discussion, due to their novelty and complexity. The study of Newton's original paper is useful for teaching Optics. It allows the teacher to notice some conceptual difficulties of colour theory.

I. Introdução

Todos nós já tivemos a agradável experiência de observar um arco-íris ou mesmo a formação de um espectro colorido após a passagem da luz solar por um prisma. O fenômeno de formação de cores devido à refração foi esclarecido por Newton em meados do século XVII.

O primeiro artigo escrito por Newton sobre esse assunto foi publicado em 1672 nas *Philosophical Transactions of the Royal Society* (NEWTON 1762). Apresentaremos aqui uma tradução completa, comentada, desse famoso artigo.

Conforme o próprio Newton informa nesse trabalho, ele não foi o primeiro a observar as cores produzidas por um prisma. De fato, o fenômeno já era conhecido, pois ele afirma que obteve “um Prisma de vidro Triangular

para tentar com ele o célebre *Fenômeno das Cores*”.

A formação do espectro colorido após a passagem da luz por um prisma já havia sido discutido por pelo menos quatro filósofos naturais: René Descartes em sua *La Dioptrique* (1637), Robert Boyle em seu livro *Experiments and considerations touching colours* (1664), Francesco Maria Grimaldi em *Physico-mathesis de lumine* (1665) e Robert Hooke em sua *Micrographia* (1665)¹. No entanto, esses estudos, que eram qualitativos e sem um aprofundamento matemático e geométrico, não levaram à explicação atualmente aceita para o fenômeno.

A explicação apresentada por Newton em 1672 para esse fenômeno é a hipótese de que a luz branca é uma mistura heterogênea de raios de todas as cores. O prisma simplesmente separa a luz branca em seus raios

*Endereços eletrônicos dos autores: cibelle@ifi.unicamp.br e rmartins@ifi.unicamp.br.

¹BOYLE, 1664, GRIMALDI, 1665, HOOKE, 1665.

componentes sem produzir nenhuma mudança no feixe de luz branca.

Atualmente, o estudo da teoria de luz e cores faz parte do ensino de óptica e está presente nos livros-texto de Física de segundo grau e universitários. Esses livros geralmente descrevem o experimento de dispersão da luz branca por um prisma: quando um feixe de luz branca incide num anteparo após passar por um prisma podemos observar nesse anteparo um espectro colorido alongado com as mesmas cores presentes no arco-íris. Esse experimento é apresentado como "prova" de que a luz branca é uma mistura de raios coloridos.

O objetivo principal dessa tradução comentada é mostrar que a hipótese da composição da luz branca aceita por todos não é tão simples como os livros apresentam. A análise do experimento de Newton pode resultar em várias interpretações e hipóteses distintas que explicam igualmente bem os fenômenos.

Como veremos pelos comentários feitos ao longo da tradução, outros elementos experimentais e teóricos são necessários para se decidir entre as possíveis hipóteses. Os livros-texto não apresentam uma discussão detalhada da questão, afirmando a composição da luz como verdade inquestionável.

O estudo histórico da questão nos mostra que o desenvolvimento e aceitação dessa hipótese foi altamente problemático². Logo após a publicação do artigo de Newton em 1672 nas *Philosophical Transactions*, várias pessoas apresentaram críticas à sua hipótese (entre elas o padre Pardies, Hooke e Huygens). Essas críticas questionaram os próprios experimentos apresentados por Newton, bem como sua interpretação desses resultados. Somente através do experimento simples de formação do espectro colorido com um prisma não é possível concluir que a luz branca é uma mistura heterogênea de raios com cores e refrangibilidades diferentes.

O estudo de um texto histórico como este tem duas importantes funções. Por um lado, ele permite captar o processo de elaboração e fundamentação de uma nova proposta científica, com todas as suas dificuldades que ficam ocultas nas descrições didáticas ou populares. É possível perceber quão complexo é o trabalho de Newton, e quão distante ele se encontra de um empirismo ingênuo. Por outro lado, há uma evidente utilidade didática nesse texto. Quando acompanhado por informações complementares, ele pode ser lido com proveito por estudantes (especialmente de nível universitário), proporcionando um vislumbre concreto dos

procedimentos científicos.

O trabalho de Newton foi escrito como uma carta a Oldenburg, o editor da revista da *Royal Society*. O texto dessa carta foi publicado na *Correspondence*³ de Newton e é quase igual ao texto que foi publicado em 1672. A versão usada para esta tradução é a que foi publicada nas *Philosophical Transactions of Royal Society of London* em 1672 e reeditada nos *Papers & Letters* (pp. 47-59). Comparamos a versão publicada nas *Transactions* com a publicada na *Correspondence*.

Agradecimentos

Um dos autores (C. C. S.) agradece ao prof. André Koch Torres de Assis pelos preciosos comentários e à CAPES-MEC pelo apoio financeiro.

II. Tradução

(3075)

Numb. 80.

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS.

February 19. 1672.

THE CONTENTS.

A Letter of Mr. Isaac Newton, Mathematick Professor in the University of Cambridge, containing his New Theory about Light and Colors: Where Light is declared to be not Similar or Homogeneous, but consisting of difform rays, some of which are more refrangible than others: And Colors are affirm'd to be not Qualifications of Light, deriv'd from Refractions of natural Bodies, (as 'tis generally believ'd,) but Original and Connate properties, which in divers rays are divers: Where several Observations and Experiments are alleg'd to prove the said Theory. An Account of some Books: I. A Description of the EAST-INDIAN COASTS, MALABAR, COROMANDEL, CEYLON, &c. in Dutch, by Phil. Baldæus. II. Antonii le Grand INSTITUTIO PHILOSOPHIÆ, secundum principia Renati Des-Cartes, nova methodo adornata & explicata. III. An Essay to the Advancement of MUSICK, by Thomas Salmon M. A. Advertisement about Theon Smyræus. An Index for the Traill of the Year 1671.

A Letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; containing his New Theory about Light and Colors: sent by the Author to the Publisher from Cambridge, Febr. 6. 1672; in order to be communicated to the R. Society.

S I R,

TO perform my late promise to you, I shall without further ceremony acquaint you, that in the beginning of the Year 1666 (at which time I applied my self to the grinding of Optick glasses of other figures than Spherical.) I procured me a Triangular glass-Prisme, to try therewith the celebrated Phenomena of Colours.

G o o o

Colours.

* Figura 1. Primeira página do artigo de Newton, publicado em 1672 na revista *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.

² Uma boa obra de referência sobre a história da óptica no período é SABRA, 1981.

³ NEWTON, 1959-1977, vol 1, pp. 92-107.

[p. 3075]⁴

Uma carta do Sr. Isaac Newton, professor de Matemática na Universidade de Cambridge; contendo sua Nova Teoria sobre Luz e Cores: enviada pelo Autor para o Editor de Cambridge, 6 de fevereiro de 1671⁷¹/₇₂; para ser comunicada à R. Society⁵.

SENHOR,

Para cumprir minha promessa anterior, devo sem mais cerimônias adicionais informar-lhe que no começo do Ano de 1666⁶ (época em que me dedicava a polir vidros ópticos de formas diferentes da *Esférica*), obtive um Prisma de vidro Triangular para tentar com ele o célebre Fenômeno das [p. 3076] Cores⁷. Para esse fim, tendo escurecido meu quarto e feito um pequeno buraco na minha janela para deixar entrar uma quantidade conveniente de luz do Sol, coloquei meu Prisma em sua entrada para que ela [a luz] pudesse ser assim refratada para a parede oposta. Isso era inicialmente um divertimento muito prazeroso: ver as cores vívidas e intensas assim produzidas; mas depois de um tempo dedicando-me a considerá-las mais seriamente fiquei surpreso por vê-las em uma forma *oblonga* que, de acordo com as leis aceitas da Refração⁸, esperava que deveria ter sido *circular*⁹

Elas terminavam dos lados em linhas retas, mas nas extremidades o enfraquecimento da luz era tão gradual que era difícil determinar corretamente qual era a sua forma; no entanto pareciam *semicirculares*.¹⁰

Comparando o comprimento deste *Espectro [Spectrum]*¹¹ colorido com sua largura, encontrei-o aproximadamente cinco vezes maior, uma desproporção tão acentuada que me excitou a uma curiosidade mais que ordinária de examinar de onde ela poderia proceder¹². Pensei que dificilmente as várias *Espessuras* de vidro, ou a terminação com sombra ou escuridão, poderiam ter qualquer Influência na luz para produzir tal efeito. Entretanto pensei que não era impropriedade examinar aquelas circunstâncias, e assim testei o que aconteceria transmitindo luz através de partes do vidro de diversas espessuras, ou através de buracos na janela de diversos tamanhos, ou colocando o Prisma fora, para que a luz pudesse passar através dele e ser refratada antes de ser limitada pelo buraco. Mas não encontrei nenhuma dessas circunstâncias significativa. A aparência das cores era em todos esses casos a mesma.

Então suspeitei se por alguma *irregularidade* no vidro ou outra irregularidade contingente essas cores po-

⁴Para permitir uma fácil comparação com o original, o início de cada página do artigo (conforme a paginação da revista *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*) será indicado entre colchetes.

⁵Até 1752 o ano novo começava em 25 de março na Inglaterra. Enquanto grande parte da Europa já havia adotado o calendário gregoriano a Inglaterra persistiu no uso do calendário juliano até 1752. Para indicar datas até o dia 25 de março usava-se uma indicação de ano na qual apareciam dois números, o primeiro indicando o ano no calendário juliano e o outro no calendário gregoriano. Após 25 de março usava-se apenas o ano comum a ambos os calendários.

⁶Nessa época (1666), Newton estava estudando no Trinity College. O tom biográfico com o qual Newton apresentou suas experiências com prismas gerou uma discussão entre historiadores da ciência tais como Ruppert Hall e Thomas S. Kuhn. Antes de 1666 Newton já fazia experiências com luz, cores e prismas. Essas experiências estão descritas no livro de anotações que Newton mantinha nessa época (veja Mc GUIRRE e TAMNY, 1983). Hall acredita que Newton descobriu a relação entre cor e índice de refração observando dois fios de cores diferentes através de um prisma, enquanto Kuhn acredita que Newton chegou a essa relação passando um feixe de luz branca através de um prisma. Sobre essa divergência veja a Introdução de Thomas S. Kuhn para os escritos ópticos de Newton, em COHEN & SCHOFIELD, 1978, p. 32.

⁷Mantivemos o uso de Newton das letras maiúsculas e itálico em algumas palavras.

⁸Newton está se referindo à lei dos senos ($\sin i / \sin r = n$), descoberta por Willbrord Snell (1591-1626) entre 1621 e 1625 e publicada primeiramente por Descartes em sua *La Dioptrique* em 1637, quase mil e quinhentos anos após Ptolomeu tentar estabelecer uma lei experimental de refração. As investigações de Ptolomeu continuaram com os árabes Ibn al-Haytham e Witelo e com Kepler que teceu considerações teóricas sobre a refração. Existe uma discussão sobre se Descartes viu ou não os manuscritos de Snell antes de publicar sua lei da refração. Como não existe documentação suficiente para se decidir sobre a prioridade da descoberta da lei dos senos, a descoberta é atribuída a ambos independentemente. Sobre os estudos da refração de Descartes, Fermat e seus antecessores veja SABRA, 1981, cap. 4; SHIRLEY, 1951 e LOHNE 1959.

⁹Este é um ponto fundamental de todo o trabalho de Newton, mas que não fica muito claro no artigo. Por que motivo Newton esperaria que a mancha luminosa produzida pela refração da luz solar no prisma fosse circular e não alongada? A resposta detalhada, que não é apresentada neste artigo de Newton, foi desenvolvida por ele em outros escritos (NEWTON, 1984). Nas condições em que Newton realizava o seu experimento, é possível provar que o feixe emergente do prisma deveria ser cônico, com a mesma abertura que o cone subentendido pelo disco solar, caso todos os tipos de raios sofressem a mesma refração no prisma.

¹⁰A aparência visual do espectro não é exatamente como Newton descreve. Sua descrição parece ser baseada mais em expectativas teóricas do que em mera observação. Visualmente, o espectro tem uma aparência parecida com uma gota. Sobre a forma do espectro observado por Newton veja LOHNE, 1968.

¹¹Em latim, no original. Newton foi o primeiro a usar a palavra *spectrum* com o significado de uma banda colorida formada por um feixe de luz branca após atravessar um prisma. Até então a palavra *spectrum* era usada para designar uma aparição ou um fantasma (*The compact edition of the Oxford English Dictionary*, vol 2. p. 2952).

¹²Neste artigo, Newton está sugerindo que sua investigação se originou da análise do alongamento do espectro luminoso e do estudo de várias explicações possíveis para o fenômeno. Os manuscritos de Newton que foram conservados (Mc GUIRRE e TAMNY, 1983) indicam que suas primeiras idéias sobre relação entre cores e diferença de refrangibilidade se originaram de um modo diferente - aproximadamente como indicado na proposição 1 do livro *Opticks* (NEWTON, 1952).

deriam ser dilatadas assim¹³. E para testar isso, tomei outro Prisma semelhante ao primeiro e coloquei-o de tal modo que a luz passando por ambos pudesse ser refratada de maneiras contrárias e assim, pelo último, retornar ao caminho do qual o primeiro a desviou. Pois por essa maneira pensei que os efeitos *regulares* do primeiro Prisma seriam destruídos pelo segundo Prisma, mas os *irregulares* mais aumentados, pela multiplicidade de refrações. Aconteceu que a luz que era difundida pelo primeiro Prisma em uma forma *oblonga*, foi reduzida pelo segundo a uma [forma] *arredondada* com tanta regularidade como quando não passava por eles. Assim, fosse qual fosse a causa daquele comprimento, não era qualquer irregularidade contingente. [p. 3077]

Então prossegui a examinar mais criticamente o que poderia ser afetado pela diferença na incidência dos Raios vindos de diferentes partes do Sol. E para esse fim medi as várias linhas e ângulos pertencentes à imagem. Sua distância do buraco ou Prisma era 22 pés; seu comprimento máximo $13\frac{1}{4}$ polegadas; sua largura $2\frac{5}{8}$; o diâmetro do buraco $\frac{1}{4}$ de polegada; os raios que se dirigiam ao meio da imagem formavam o ângulo de $44^\circ 56'$ com as linhas em que teriam avançado sem refração¹⁴. E o Ângulo vertical do Prisma, $63^\circ 12'$.

Também as Refrações em ambos os lados do Prisma, isto é, dos Raios Incidentes e Emergentes, eram tão próximas quanto pude fazê-las¹⁵ e conseqüentemente cerca de $54^\circ 4'$ ¹⁶. E os Raios incidiam perpendicularmente¹⁷ sobre a parede¹⁸. Ora, subtraindo o diâmetro do buraco do comprimento e

largura da Imagem, restam 13 polegadas de comprimento e $2\frac{3}{8}$ de largura, compreendidas por aqueles Raios que passaram através do centro do dito buraco e conseqüentemente o ângulo do buraco correspondente àquela largura era $31'$, compatível com o Diâmetro Solar. Mas o ângulo que esse comprimento subentendia era mais que cinco vezes tal diâmetro, ou seja, $2^\circ 49'$.

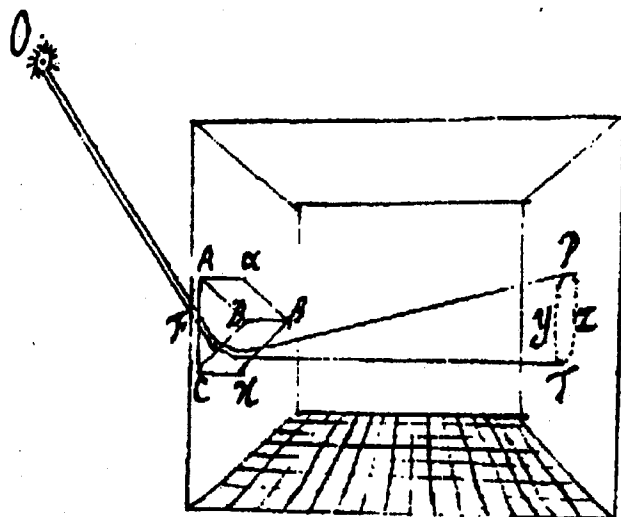


Figura 2. Esquema de Newton (não publicado em 1672) para o primeiro experimento descrito em seu artigo de 1672: um feixe de luz solar passa por um prisma e forma uma mancha colorida alongada na parede oposta de um quarto escuro.

Tendo feito essas observações, primeiro computei delas o poder refrativo do vidro e encontrei-o medido pela *razão* dos senos, 20 para 31¹⁹. E então, por aquela

¹³ A hipótese que Newton vai discutir agora é a de que o fenômeno de formação de um espectro alongado é causado por irregularidades do prisma, como bolhas de ar no vidro ou imperfeições de suas superfícies.

¹⁴ Isto é, o desvio sofrido pelos raios incidentes era $\delta = 44^\circ 56'$.

¹⁵ Quando os ângulos de incidência e de emergência são iguais dizemos que o prisma está ajustado na posição de mínimo desvio dos raios. Nessa posição, pequenas variações no ângulo de incidência não afetam o ângulo de emergência do raio luminoso. A demonstração deste fato em linguagem moderna pode ser encontrada em vários livros básicos de óptica, por exemplo em ALONSO & FINN, 1972, vol II, pp. 407-8.

¹⁶ Provavelmente Newton calculou o valor dos ângulos de incidência e emergência de acordo com a óptica geométrica que estabelece que $\delta + A = i + r$, onde δ é o desvio sofrido pelo raio incidente, A o ângulo vertical do prisma, i o ângulo de incidência e r o ângulo de emergência. Como $i = r$ temos que $2i = \delta + A = 108^\circ 8'$.

¹⁷ Quando a luz não incide perpendicularmente sobre o anteparo a imagem formada é oblonga independentemente da constituição da luz.

¹⁸ No começo do ano de 1666 no calendário juliano (veja nota 1) é inverno no hemisfério norte. Na Inglaterra, nessa época do ano, o Sol nunca fica $44^\circ 56'$ acima do horizonte como requer o experimento descrito por Newton. Além disso, é muito difícil satisfazer ambas as condições (prisma ajustado na posição de mínimo desvio e a incidência normal dos raios na parede) simultaneamente pois a posição do Sol está sempre variando. O azimute solar varia cerca de $15'$ por minuto devido ao movimento diurno. Sendo assim o Sol estará na posição correta durante um pequeno intervalo de tempo. Além disso a altura do Sol muda vários minutos por dia devido ao movimento anual (exceto próximo aos equinócios). Há uma maneira de se manter os raios incidentes na posição correta independentemente do dia e da hora. Para isto basta que um espelho externo móvel reflita a luz para o lugar adequado através do buraco na janela. Um assistente externo pode mudar a orientação do espelho compensando a variação da posição do Sol. Newton apresentou uma outra sugestão para resolver o problema da incidência normal do feixe defletido. Numa versão mais antiga do experimento ele sugere que a imagem pode ser formada tanto na parede quanto num papel móvel. É claro que é muito mais fácil mover o papel e manter a incidência normal dos raios solares nesse papel. No entanto torna-se difícil fazer as medidas necessárias, nesse caso. Embora Newton não tenha discutido os detalhes e dificuldades presentes na reprodução de seu primeiro experimento, elas existem e foram enfrentadas por várias pessoas que tentaram reproduzi-lo.

¹⁹ Como Newton usava a relação entre os senos invertida em relação à usada hoje, obteve que $\text{sen } i / \text{sen } r = 20 / 31$. Isso significa em linguagem atual que o índice de refração do vidro usado por Newton era aproximadamente $31 / 20 = 1,55$. É fácil verificar o

razão, computei as Refrações de dois Raios provindos de partes opostas do disco Solar, diferindo em 31' em sua obliquidade de incidência, e encontrei que os Raios emergentes deveriam compreender um ângulo de cerca de 31' como faziam antes de incidir [no prisma]²⁰.

Esse cálculo estava fundamentado na Hipótese da proporcionalidade dos senos da Incidência e da Refração. Por minha própria experiência²¹, eu não poderia imaginar que ela fosse tão errônea que fizesse aquele Ângulo de apenas 31', quando na realidade era 2° 49'²². Assim, minha curiosidade fez-me novamente tomar meu Prisma. E tendo colocado-o na minha janela, como antes, observei que girando-o um pouco em torno de seu eixo para um lado e para outro, para variar sua obliquidade em relação à luz, de um ângulo de mais de 4 ou 5 graus, as Cores não eram sensivelmente transladadas de seus lugares na parede e conseqüentemente, pela variação da Incidência, a quantidade da Refração não era sensivelmente variada²³. Por esse Experimento portanto, bem como pelo cálculo anterior, era evidente que a diferença na incidência dos Raios provindos de diversas [p. 3078] partes do Sol, não poderia fazê-los após a intersecção divergir em um ângulo tão sensivelmente

maior que aquele com o qual convergiram. Como ele era no máximo cerca de 31 ou 32 minutos, ainda restava alguma outra causa para ser encontrada, pela qual ele pudesse ser 2° 49'²⁴.

Então comecei a suspeitar se os Raios, após sua passagem através do Prisma, não se moveriam em linhas curvas e de acordo com sua maior ou menor curvatura tendessem para diversas partes da parede²⁵. E minhas suspeitas aumentaram quando lembrei que freqüentemente vi uma bola de Tênis, golpeada com uma Raquete oblíqua, descrever tal linha curva. Pois sendo comunicado tanto um movimento circular como um progressivo a ela pelo golpe, suas partes daquele lado onde os movimentos se unem devem pressionar e bater o Ar contíguo mais violentamente do que no outro, e lá excitar uma relutância e reação no Ar proporcionalmente maior. E pela mesma razão, se os Raios de luz fossem possivelmente corpos globulares e por sua passagem oblíqua de um meio a outro adquirissem um movimento circular, eles deveriam sentir a resistência maior do Éter ambiente naquele lado onde os movimentos se unem e por isso serem continuamente encurvados

cálculo de Newton: nas condições do experimento, o ângulo de incidência da luz na primeira face do prisma era de 54° 4' e o ângulo de refração era a metade do ângulo do vértice do prisma, ou seja, 31° 36'. Calculando-se o índice de refração do vidro, obtém-se 1,545 ou, aproximadamente, 1,55 = 31/20, conforme calculado por Newton.

²⁰Newton apenas indica o tipo de cálculo que efetuou, sem os detalhes. Provavelmente ele realizou uma série de cálculos bastante maçantes: considerou dois raios luminosos, incidindo sobre a primeira face do prisma, com ângulos um pouco diferentes de 54° 4', de tal forma a formarem um ângulo de 31' entre si (ou seja, um deles seria de 54° 19,5' e o outro 53° 48,5'). Calculou, então, as direções dos raios refratados pela primeira superfície do prisma, depois os ângulos de incidência (internos) na segunda face do prisma, e por fim os ângulos dos raios refratados (externos) que saem do prisma. A diferença obtida entre esses dois últimos ângulos foi de 31'. Ou seja: a abertura do feixe incidente é igual à abertura do feixe que sai do prisma, nessas condições. Note-se que Newton apenas se preocupa em discutir o ângulo vertical formado pelos raios e não a abertura horizontal do feixe. Implicitamente, Newton supões que o ângulo horizontal não poderia sofrer mudança ao passar pelo prisma.

²¹Na versão manuscrita publicada na Correspondence existem as palavras "e outras", se referindo à experiência de outras pessoas.

²²Como o prisma de Newton estava ajustado na posição de mínimo desvio, de acordo com a lei da refração de Snell-Descartes ("Hipótese da proporcionalidade dos senos") a pequena variação de 31' entre os ângulos de incidência devido ao diâmetro finito do Sol não deveria afetar o formato circular da imagem, ou seja, o ângulo formado pelos raios emergentes deveria ser 31'. O argumento usado por Newton nessa demonstração é muito bonito e único pois não encontramos nada semelhante nos livros modernos de óptica. A demonstração geométrica da formação de uma imagem circular após o feixe atravessar um prisma ajustado na posição de mínimo desvio é bastante complexa. Essa demonstração está feita em NEWTON 1984, vol. 1, pp. 53-4. Como podemos perceber pelo seu texto, Newton não enfatiza a grande importância do posicionamento adequando do prisma em seus experimentos, logo é natural que ele tenha sido mau entendido.

²³Ao girar um pouco o prisma, Newton está alterando o ângulo de incidência dos raios sobre a primeira face. Ele observa que a mancha luminosa na parede não muda sensivelmente de lugar. Portanto, o desvio total sofrido pelos raios ao passar pelo prisma, nas condições do experimento (posição de desvio mínimo do prisma), é quase constante quando o ângulo de incidência do raio no prisma varia pouco (4 a 5 graus). Portanto, os raios provenientes de diferentes pontos do Sol que atingem o prisma (e que formam entre si ângulos de no máximo 31') deveriam também sofrer desvios praticamente iguais e, portanto, conservar o ângulo que formavam entre si. Esse é um novo argumento para indicar que a mancha produzida na parede deveria ser circular.

²⁴Quando o prisma está ajustado numa posição qualquer diferente da posição de mínimo desvio a imagem formada é oblonga pois a diferença entre os ângulos de incidência dos raios provenientes das partes opostas do disco solar é significativa a ponto de causar o alongamento da imagem. O descuido de Newton ao explicar a posição correta do prisma em seu experimento resultou em críticas por parte de Ignace Pardies que não compreendeu a necessidade da introdução de novas hipóteses sobre a constituição da luz branca. Veja a correspondência entre Newton e Pardies: COHEN & SCHOFIELD, 1978, pp. 86-92 e 104-109.

²⁵Grimaldi havia descoberto o fenômeno de difração da luz, e para explicá-lo havia proposto que os raios da luz, após passar por uma fenda estreita ou por um fio fino, descreviam trajetórias curvas. Para saber mais sobre a teoria ondulatória de Grimaldi veja HALL, 1987. Se, após passar pelo prisma, os raios se encurvassem de modo a aumentar a abertura do feixe no sentido vertical e manter a abertura no sentido horizontal, isso explicaria o formato alongado do espectro.

para o outro²⁶. Mas apesar desse motivo plausível de suspeita, quando o examinei não pude observar tal curvatura neles. E além disso (o que era suficiente para o meu propósito) observei que a diferença entre o comprimento da imagem e o diâmetro do buraco através do qual a luz era transmitida era proporcional à sua distância²⁷.

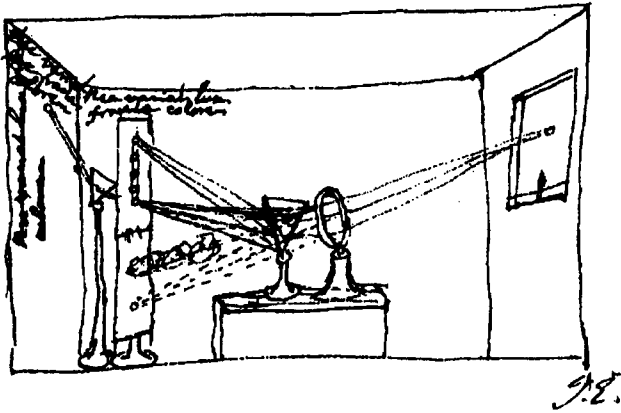


Figura 3. Esquema de Newton (não publicado em 1672) que mostra uma das variantes do *experimentum crucis*. A luz proveniente do Sol é decomposta por um primeiro prisma. Uma lente, colocada antes do prisma, focalizada sobre um anteparo, permite produzir um espectro fino e com cores bem definidas. Um furo no anteparo permite que uma pequena faixa do espectro passe por um segundo prisma. Esse segundo prisma não decompõe a luz em novas cores, apenas produz uma mancha da cor selecionada.

A remoção gradual dessas suspeitas finalmente levou-me ao *Experimentum Crucis*²⁸, que era este: tomei duas pranchas e coloquei uma delas perto da janela

e atrás do prisma de tal forma que a luz pudesse passar através de um pequeno buraco feito nela para esse propósito, e incidir na outra prancha, a qual coloquei a uma distância de cerca de 12 pés, tendo primeiro feito um pequeno buraco nela também, para um pouco da luz Incidente passar através dele. Então eu coloquei outro Prisma atrás dessa segunda prancha, de tal modo que a luz que atravessou ambos os anteparos pudesse passar através dele também e ser novamente refratada antes de atingir a parede. Isto feito, tomei o primeiro Prisma na minha mão e o girei de um lado para o outro lentamente em torno de seu *Eixo* de modo a fazer as diversas partes da Imagem, lançadas sobre o segundo anteparo, passarem sucessivamente através de seu buraco, para que pudesse observar para quais lugares na parede o segundo Prisma as refrataria [p. 3079]. E vi²⁹ pela variação daqueles lugares [na parede] que a luz, tendendo para aquela extremidade da Imagem em direção à qual a refração do primeiro Prisma foi feita, sofreu no segundo Prisma uma Refração consideravelmente maior que a luz tendendo para a outra extremidade. E assim a verdadeira causa do comprimento da Imagem foi detectada não ser outra, senão que a *Luz* consiste em *Raios diferentemente refrangíveis*³⁰ que, sem qualquer diferença em suas incidências, foram, de acordo com seus graus de refrangibilidade, transmitidos em direção a diversas partes da parede³¹.

²⁶Essa hipótese sugerida por Newton é semelhante à explicação de Descartes para o surgimento de cores. Segundo Descartes a luz é um movimento transmitido através do éter compostos por pequenos glóbulos que penetram todos os corpos. Antes da luz ser refratada esses glóbulos têm apenas um movimento retilíneo na direção de propagação. Quando atingem obliquamente uma superfície refratora os glóbulos adquirem um movimento de rotação em torno de seus próprios eixos. A velocidade da rotação é afetada pela velocidade dos glóbulos vizinhos. Assim os glóbulos dos raios vermelhos do espectro pressionam os glóbulos vizinhos da região de sombra (glóbulos com velocidade de rotação pequena) e são pressionados pelos do outro lado cuja velocidade é maior. A diferença de velocidade entre os glóbulos vizinhos provoca um desvio dos raios. O efeito dos glóbulos vizinhos à extremidade violeta do espectro é contrário ao produzido nos raios vermelhos. As outras cores são resultado de velocidades intermediárias dos glóbulos. Para maiores detalhes na teoria de Descartes sobre luz e cores veja SABRA, 1981, cap. 2.

²⁷Se os raios luminosos descrevessem trajetórias curvas após passar pelo prisma, o feixe emergente não seria cônico e não valeria a proporcionalidade entre o tamanho da mancha e sua distância ao orifício.

²⁸O uso do termo *Experimentum Crucis* para designar um experimento decisivo é devido à influência da obra *Novum Organon* de Francis Bacon (BACON, 1972, II, XXXV). Bacon usa o termo *instantiae crucis* como uma situação crucial na qual deve-se escolher entre dois caminhos diferentes ou entre duas hipóteses distintas. Isso só pode ser feito através de um experimento que mostre qual das hipóteses é a correta. Hooke cita Bacon em sua *Micrographia* (HOOKE, 1665, p. 54). Como provavelmente escreve de memória usa a frase errada: *experimentum crucis* ao invés de *instantiae crucis*. Newton usa o termo empregado por Hooke sob influência de sua leitura da *Micrographia*. Sobre o papel do termo *experimentum crucis* para Bacon, Hooke e Newton veja LOHNE, 1968.

²⁹O *Experimentum Crucis* é um experimento qualitativo, isto é, nele não se faz medidas para estudar a relação entre cor e refrangibilidade, embora a refrangibilidade seja um conceito quantitativo. Através de experimentos qualitativos pode-se estabelecer uma relação entre cor e refrangibilidade que não é precisa pois pode acontecer de uma cor ser sempre a menos refratada mesmo sofrendo refrações diferentes. Para se estabelecer uma relação exata são necessários experimentos quantitativos. Newton não os fez.

³⁰Newton utiliza a palavra "refrangibilidade" para indicar uma propriedade dos raios luminosos: os raios mais refrangíveis são os que são mais desviados na refração. Por outro lado, o termo "refringência" se refere a uma propriedade das substâncias transparentes: uma substância mais refringente é a que produz um maior desvio da luz.

³¹Através do *Experimentum Crucis* Newton não associou cor com refrangibilidade. No entanto, suas intenções com o *Experimentum Crucis* mudam durante as discussões com seus críticos. Em sua resposta a Hooke, Newton afirma que o objetivo de seu *Experimentum Crucis* é mostrar "que Raios de cores diferentes considerados separadamente sofrem, com incidências iguais, refrações diferentes sem

Quando entendi isso, deixei meus trabalhos com Vidro acima mencionados; pois vi que a perfeição de Telescópios era limitada³², não tanto devido à necessidade de vidros com formas exatas de acordo com a prescrição de Autores Ópticos³³ (o que todos tinham imaginado até aqui) mas porque a Luz é ela própria uma *Mistura heterogênea de Raios diferentemente refrangíveis*. Ou seja, mesmo se um vidro fosse formado tão exatamente que coletasse qualquer tipo de raios em um ponto, ele não poderia coletar também no mesmo ponto aqueles que, tendo a mesma Incidência sobre o mesmo Meio, são aptos a sofrer uma refração diferente. Mais ainda, maravilhei-me vendo que a diferença da refrangibilidade era tão grande como encontrei, e os Telescópios pudessem atingir aquela perfeição a que chegaram atualmente. Pois, medindo a refração de um de meus Prismas, encontrei que, supondo o *seno* comum da Incidência sobre um de seus planos 44 partes, o *seno* da refração dos Raios extremos na extremidade vermelha das Cores, feitos do vidro para o Ar, seria 68 partes e o *seno* da refração dos raios extremos na outra extremidade 69 partes, ou seja, a diferença é cerca de 1/24 ou 1/25 da refração total³⁴. E conseqüentemente a lente objetiva de qualquer Telescópio não pode coletar todos

os raios que vêm de um ponto de um objeto para fazê-los reunirem-se em seu *foco* num espaço menor que um espaço circular cujo diâmetro seja de 1/50 do Diâmetro de sua Abertura³⁵, o que é uma irregularidade algumas centenas de vezes maior do que aquela que uma *Lente* de forma circular, de uma seção tão pequena como são as lentes Objetivas de um longo Telescópio, poderia causar pela inadequação de sua forma, se a Luz fosse *uniforme*³⁶.

Isso me fez considerar as *Reflexões* e encontrando-as regulares, de modo que o Ângulo de Reflexão de todos os tipos de Raios era igual aos seus Ângulos de Incidência, entendi que por seu intermédio os instrumentos ópticos poderiam ser levados até qualquer grau de perfeição imaginável, contanto que uma substância *Refletora* pudesse ser [p. 3080] encontrada que pudesse ser polida tão finamente quanto o Vidro e *refletisse* tanta luz quanto o vidro *transmite*, e a arte de comunicarlhe uma figura *Parabólica* também fosse atingida. Mas pareciam existir dificuldades muito grandes e quase as pensei insuperáveis, quando além disso considerei que cada irregularidade nas superfícies refletoras faz os raios desviarem-se 5 ou 6 vezes mais fora de seu devido curso que semelhantes numa refratora³⁷, de tal modo que se-

serem separados, rarefeitos ou dilatados de qualquer maneira" (COHEN & SCHOFIELD, 1978, p. 134). Em sua resposta a Lucas afirma que o objetivo de seu *Experimentum Crucis* é mostrar a "refrangibilidade diferente da luz" (COHEN & SCHOFIELD, 1978, p. 174) sem qualquer relação com outras propriedades.

³²Essa limitação se deve à certeza de Newton da impossibilidade de se construir lentes acromáticas. Uma lente acromática é uma lente composta por combinação de materiais com poder dispersivo diferentes. Newton afirma em sua *Opticks* (NEWTON, 1952 pp. 129-132) que a construção de tais lentes acromáticas era impossível. A confiança de Newton na impossibilidade da construção de lentes acromáticas retardou o desenvolvimento desse tipo de lente até o século XVIII quando foram construídas por Chester Moor Hall e John Dolland. Sobre essa falha de Newton veja o artigo BECHLER, 1973.

³³Newton está se referindo a superação da aberração esférica que é um defeito de focalização inevitável em lentes com o formato esférico. A aberração esférica ocorre porque o ângulo de incidência dos raios que atravessam a periferia da lente é diferente do ângulo de incidência dos raios que atravessam a região próxima ao eixo de simetria da lente, sendo assim são focalizados em pontos diferentes. Lentes com formatos diferentes do esférico são difíceis de se construir pois o polimento tem que se dar em direções preferenciais de acordo com a forma desejada. René Descartes, por exemplo, havia estudado várias formas especiais de lentes na sua *Dioptrique*.

³⁴É difícil entender o que Newton quer dizer aqui. A diferença entre os índices de refração para a extremidade azul e para a extremidade vermelha seria de 1/68 ou 1/69 e não 1/24 ou 1/25. Possivelmente Newton estaria se referindo à diferença entre os desvios sofridos pelos raios extremos ao passarem pelo prisma. No entanto, fazendo-se esse cálculo, obtém-se uma diferença de 1/20 entre os desvios angulares totais sofridos pelos dois raios. Outra possibilidade é que Newton esteja se referindo ao desvio de um raio que passe do vidro para o ar, medindo esse desvio pelo seno do ângulo (e não pelo ângulo). Nesse caso, como o seno de incidência é 44 unidades e o seno de refração é de 68 ou 69 unidades, a variação de direção do raio é dada por 24 ou 25 unidades, com uma diferença de uma parte em 24 ou 25.

³⁵Utilizando o dado anterior de Newton, suponhamos que um feixe cilíndrico de luz branca incide paralelamente ao eixo de uma lente simples. Na lente, os raios extremos (vermelho e violeta) sofrerão desvios diferentes e se concentrarão em focos colocados em pontos diferentes. Seja F1 a distância focal para os raios vermelhos e F2 a distância focal para os raios violetas extremos. Teríamos $F1 \cong (1+1/25).F2$. A região onde a luz proveniente da lente estaria mais concentrada não seria em nenhum desses dois focos, mas em um ponto intermediário, ou seja, a uma distância $F' \cong (1+1/50).F2$. É fácil verificar, geometricamente, que nesse ponto os diâmetros dos cones extremos (violeta e vermelho) produzidos pela lente terão um diâmetro que será 1/50 do diâmetro da lente. Portanto, esse será o diâmetro mínimo da imagem de um ponto luminoso (branco) distante produzida pela lente.

³⁶Aqui, Newton está se referindo a problemas causados pela aberração esférica de lentes - que é um problema muito menor do que o de aberração cromática.

³⁷É difícil, novamente, reconstruir o raciocínio de Newton neste ponto. Uma imperfeição angular $\delta\alpha$ em um ponto de uma superfície refletora produz uma variação $\delta\beta = 2\delta\alpha$ na direção de um raio refletido. No caso de uma lente de vidro fina, de grande distância focal, se o índice de refração do vidro for cerca de 3/2, então o desvio do raio luminoso, ao atravessar uma superfície com uma variação angular $\delta\alpha$ terá uma variação de desvio de aproximadamente $1/2 \delta\alpha$. Portanto, os defeitos em espelhos produzem efeitos quatro vezes maiores

ria exigido aqui um cuidado muito maior do que para dar forma aos vidros para Refração.

Entre esses pensamentos fui forçado a sair de *Cambridge* pela Praga Interveniente³⁸ e foram-se mais de dois anos antes de eu prosseguir além. Mas então, tendo pensado num modo suave de polimento próprio para metal, pelo qual, como imaginei, a forma também poderia ser corrigida até o último [grau]; comecei a tentar o que poderia ser efetuado nessa linha e gradualmente aperfeiçoei tanto um Instrumento (em suas partes essenciais, semelhante ao que enviei para *Londres*), que por ele pude discernir 4 [luas] Acompanhantes de Júpiter e mostrei-os diversas vezes para outros dois conhecidos meus. Pude também discernir as fases de *Vênus* semelhantes às da Lua, mas não muito distintamente nem sem alguma adequação na disposição do Instrumento³⁹.

Fui interrompido daquele tempo até esse último Outono quando fiz o outro [instrumento] e como aquele era sensivelmente melhor que o primeiro (especialmente para Objetos Diurnos) então não duvidei que eles ainda serão levados a uma perfeição muito maior pelos esforços daqueles que, como você me informou, estão cuidando disso em *Londres*.

Pensei algumas vezes em fazer um *Microscópio* que de maneira semelhante tivesse, ao invés de uma lente Objetiva, uma peça Refletora de metal. E espero que eles também tomem isso em consideração pois aqueles Instrumentos parecem tão suscetíveis de aperfeiçoamento quanto os *Telescópios* e talvez mais, porque só é necessário um pedaço de metal refletor neles, como você perceberá pelo diagrama anexo onde AB representa a objetiva de metal, CD o vidro ocular, F seus Focos comuns e O o outro foco do metal no qual o ob-

(e não 5 ou 6 vezes maiores) do que os defeitos em lentes.

³⁸Devido à praga que atingiu a Inglaterra entre 1665 e 1666 a Universidade de Cambridge foi fechada e Newton voltou a morar em Woolsthorpe. Enquanto, nesse período de praga, outros estudantes de Cambridge organizaram grupos de estudo com tutores, Newton continuou seus estudos sozinho. Esse período em que Newton permaneceu em Woolsthorpe (1664-1666) ficou conhecido como *anni mirabiles* devido à grande produção de Newton em matemática, mecânica, gravitação e seus estudos em óptica. Sobre esse período veja WESTFALL, 1995, cap. 3.

³⁹Newton enviou seu telescópio à Royal Society no final de dezembro de 1671. Devido ao grande interesse e sucesso alcançados por seu instrumento Newton foi nomeado sócio da sociedade em 11 de janeiro de 1671/72 (WESTFALL, 1995, p. 83).

⁴⁰Na versão publicada na *Correspondence* há um trecho que foi omitido na publicação da *Philosophical Transactions*: "Um naturalista raramente esperaria ver a ciência daquelas [das cores] tornar-se matemática, contudo ousou afirmar que há tanta certeza nisso quanto em qualquer outra parte da óptica. Pois, o que afirmarei sobre elas não é uma Hipótese suposta simplesmente inferindo assim e não de outra maneira ou porque ela satisfaz todos os fenômenos (os Tópicos Filosóficos universais), mas a mais rígida consequência evidenciada pelo intermédio de experimentos e concluída imediatamente e sem qualquer suspeita de dúvida. Para continuar a narração histórica desses experimentos poderia fazer um discurso igualmente tedioso e confuso e portanto (...)" (NEWTON, 1959-77, vol. 1, pp. 96-7).

⁴¹Aqui Newton propõe a relação entre cores e índices de refração. Evidentemente, o índice de refração depende não apenas da cor, mas também da substância considerada. Por outro lado, somente existe uma relação entre cor e índice de refração para as *cores simples*. A distinção entre cores simples e compostas, que é nova e essencial na teoria de Newton, aparece apenas no proposição 5.

eto é colocado.

[p. 3081] Mas, para voltar dessa digressão, informei-lhe que a Luz não é similar ou homogênea, mas consiste de Raios *difformes*, alguns dos quais são mais refrangíveis que outros; de tal modo que, daqueles que incidem de modo semelhante no mesmo meio, alguns serão mais refratados que outros, e não por qualquer virtude do vidro ou outra causa externa, mas por uma predisposição que cada Raio particular tem de sofrer um grau particular de Refração.

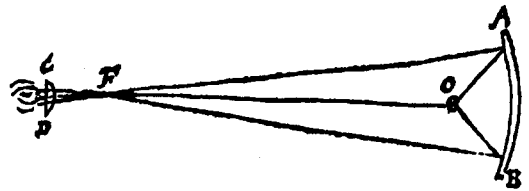


Figura 4. Desenho do artigo de Newton (1672), mostrando esquema para microscópio refletor. AB é um espelho, próximo a cujo foco é colocado o objeto O. CD é uma lente ocular.

Agora prosseguirei para informá-lo de outra diformidade mais notável nesses Raios, pela qual a *Origem da Cores* é revelada⁴⁰. Relativamente a ela, irei primeiro apresentar a *Doutrina* e então, para seu exame, dar-lhe um ou dois exemplos de *Experimentos*, como amostras do restante.

A Doutrina o senhor encontrará compreendida e ilustrada nas seguintes proposições:

1. Como os Raios de luz diferem em graus de Refrangibilidade, eles também diferem em sua disposição para exibir essa ou aquela cor particular⁴¹. Cores não são *Qualificações da Luz* derivadas de Refrações ou Reflexões dos Corpos naturais (como é geralmente acreditado) mas *propriedades Originais e inatas* que são di-

ferentes nos diversos Raios⁴². Alguns Raios são dispostos a exibir uma cor vermelha e nenhuma outra; alguns uma amarela e nenhuma outra, alguns uma verde e nenhuma outra e assim por diante. Nem há apenas Raios próprios e particulares para as cores mais importantes mas mesmo para todas as cores intermediárias⁴³.

2. Ao mesmo grau de Refrangibilidade sempre pertence a mesma cor e à mesma cor sempre pertence o mesmo grau de Refrangibilidade⁴⁴. Os Raios *menos Refrangíveis* são todos dispostos a exibir uma cor *Vermelha*, e contrariamente aqueles Raios que são dispostos a exibir uma cor *Vermelha* são todos os menos refrangíveis. Da mesma forma os Raios *mais refrangíveis* são todos dispostos a exibir uma *Cor Violeta* profunda e contrariamente aqueles que são aptos a exibir tal cor violeta são os mais Refrangíveis. E assim a todas as cores intermediárias, em uma série contínua, pertencem graus intermediários de refrangibilidade. E essa Analogia entre cores e refrangibilidade é muito precisa e estrita: os Raios sempre concordando exatamente em ambas ou discordando proporcionalmente em ambas.

3. A espécie de cor e o grau de Refrangibilidade próprio de qualquer tipo particular de Raio não são mutáveis pela Refração, pela Reflexão de corpos naturais nem por qualquer outra causa que pude observar até agora⁴⁵. Quando qualquer tipo de Raios foi bem [p. 3082] separado daqueles de outros tipos, ele depois reteve obstinadamente sua cor, apesar de meus maio-

res esforços para mudá-la. Refratei-o com Prismas e refleto-o com corpos que na luz do Dia eram de outras cores. Interceptei-o com filmes coloridos de Ar entre duas placas de vidro comprimidas; transmiti-o através de Meios coloridos e através de Meios irradiados com outros tipos de Raios, e limitei-o de várias formas; e contudo nunca pude produzir qualquer nova cor dele. Ele poderia, por contração ou dilatação, tornar-se mais vivo ou fraco e em alguns casos, pela perda de muitos Raios, muito obscuro e escuro; mas nunca pude ver qualquer mudança *in specie*.

[4.]⁴⁶ No entanto, podem ser feitas transmutações aparentes de Cores, onde há qualquer mistura de diversos tipos de Raios. Pois em tais misturas as cores componentes não aparecem, mas constituem uma cor intermediária pela mútua combinação uma com a outra⁴⁷. E portanto, se por refração ou qualquer outra das causas acima mencionadas os Raios diformes latentes em tal mistura forem separados, emergirão cores diferentes da cor da composição⁴⁸. Tais cores não são Novamente geradas mas apenas se fazem Aparentes por serem separadas; pois se forem novamente inteiramente misturadas e mescladas juntas, elas irão novamente compor aquela cor que compunham antes da separação. E pela mesma razão, as Transmutações⁴⁹ feitas pela convergência de diversas cores não são reais pois quando os Raios diformes forem novamente cortados eles exibirão as mesmas cores que exibiam antes de

⁴² Ou seja: as cores dos raios luminosos não podem ser alteradas por refrações ou reflexões. É claro que isso também só se aplica às cores simples.

⁴³ Newton provavelmente está se referindo a teoria de Hooke de formação das cores. Em sua *Micrographia* (HOOKE, 1665 p. 54-59), Hooke descreve sua teoria de formação das cores. Segundo ele, a luz branca é um pulso simples e homogêneo que se propaga no éter. Quando esse pulso atinge uma superfície refratora ele é modificado pela ação dessa superfície, resultando duas cores básicas (o azul e o vermelho), as outras cores são resultado da mistura do azul e vermelho em diferentes proporções. Atualmente sabemos que combinando diferentes proporções de azul espectral próximo da região verde do espectro com vermelho próximo do amarelo é possível produzir um grande número de tonalidades de azul, verde, vermelho, amarelo e cores intermediárias. Como vemos, esta teoria não é tão absurda como pode parecer num primeiro instante. Sobre estudos modernos com cores espectrais veja o artigo HELMHOLTZ, 1852.

⁴⁴ Newton deveria ter explicitado que a relação entre cor e grau de refrangibilidade só pode ser estabelecida para cores simples ou puras. Existem diferentes vermelhos no espectro luminoso e cada um deles tem uma refrangibilidade diferente. Por outro lado, uma luz vermelha comum (não pura) contém raios de diferentes refrangibilidades.

⁴⁵ Novamente é preciso assinalar que a cor da luz *pode* ser alterada por reflexão e refração, se a luz não for pura ou simples (homogênea).

⁴⁶ No artigo original, foi omitido o número desta proposição.

⁴⁷ A visão não permite identificar se uma cor é simples ou uma mistura de cores simples. Nesse sentido, a visão se comporta de um modo diferente da audição, pois a estrutura do ouvido nos permite distinguir diferentes sons ouvidos simultaneamente. Quando o ouvido recebe sinais de duas frequências diferentes, a sensação produzida não se assemelha à que é causada por um som simples de frequência intermediária. O fato de, no caso da visão, não conseguirmos perceber a existência de diversas cores em uma mistura torna a teoria de Newton pouco intuitiva, exigindo a introdução do conceito de cores componentes inobserváveis.

⁴⁸ Não é pelos sentidos, mas através de um prisma que se *pode* identificar se uma cor é simples ou composta. O uso de prismas proporciona, portanto, um tipo de definição operacional dos tipos de cores: as cores que não são decompostas ou separadas por um prisma são simples; as que são decompostas ou separadas por um prisma são compostas. Segue-se, portanto, da *definição operacional* de cores compostas que a luz branca é composta.

⁴⁹ Em NEWTON, 1959-77, vol 1, p. 98, nota 21, Turnbull se refere a uma parte do manuscrito encontrada recentemente consistindo de 8 páginas numeradas de 9 a 16, começando na segunda metade da palavra "Transmutations". Depois dessas páginas a carta prossegue.

entrarem na composição. Como o senhor vê, pós *Azuis* e *Amarelos* quando finamente misturados aparecem a olho nu *Verdes* e entretanto as Cores dos corpúsculos Componentes não são desse modo realmente transmutadas mas apenas mescladas. Pois, quando vistas com um bom Microscópio, elas ainda aparecem *Azuis* e *Amarelas* intercaladamente⁵⁰.

5. Há portanto dois tipos de Cores: um original e simples, o outro composto dessas. As cores Originais ou primárias são *Vermelho*, *Amarelo*, *Verde*, *Azul* e um *Púrpura-violeta*, junto com *Laranja*, *Índigo* e uma variedade indefinida de gradações Intermediárias⁵¹.

6. As mesmas cores em *specie* com essas Primárias podem também ser produzidas por composição, pois uma mistura de *Amarelo* e *Azul* forma *Verde*, de *Vermelho* e *Amarelo* forma *Laranja*, de *Laranja* e *Verde amarelado* forma *amarelo*. E em geral, se são misturadas duas Cores quaisquer que na série daquelas geradas pelo Prisma não [p. 3083] são muito distantes uma da outra, elas por sua mútua mistura compõem aquela cor que na dita série aparece no meio caminho entre elas. Mas aquelas que estão situadas a uma distância muito grande não o fazem. *Laranja* e *Índigo* não produzem o Verde intermediário nem *Escarlate* e *Verde* o amarelo intermediário⁵².

7. Mas a composição mais surpreendente e maravilhosa foi aquela da *Brancura*. Não há nenhum

tipo de Raio que sozinho possa exibi-la. Ela é sempre composta, e para sua composição são necessárias todas as Cores primárias citadas anteriormente misturadas numa proporção devida⁵³. Frequentemente tenho observado que fazendo convergir todas as Cores do Prisma e sendo desse modo novamente misturadas como estavam na luz antes de sua Incidência sobre o Prisma, reproduziram luz inteiramente e perfeitamente branca e não diferindo sensivelmente⁵⁴ da Luz *direta* do Sol, a não ser quando os vidros que usei não eram suficientemente claros; pois então elas poderiam se inclinar um pouco para *suas* [dos vidros] cores.

8. Disso portanto vem que *Brancura* é a cor usual da Luz, pois a Luz é um agregado confuso de Raios dotados de todos os tipos de Cores, como elas [as cores] são promiscuamente lançadas das várias partes dos corpos luminosos. E de tal agregado confuso, como disse, é gerada *Brancura*, se houver uma devida proporção de Ingredientes, mas se algum predominar a Luz deve tender para aquela cor, como acontece na chama *Azul* do Enxofre, na chama *amarela* de uma Vela e nas várias cores das estrelas Fixas.

9. Consideradas essas coisas, a *maneira* como as cores são produzidas pelo Prisma é evidente. Pois dos Raios que constituem a luz incidente, como aqueles que diferem em Cores diferem proporcionalmente em Refrangibilidade, *eles* por suas refrações diferentes de-

⁵⁰O verde produzido pela mistura de pigmentos azul e amarelo é resultado de um processo subtrativo de mistura de cores, um processo diferente do que ocorre com a mistura de luz com cores diferentes. A mistura de pigmentos de todas as cores resulta uma cor cinzenta enquanto que a mistura de luz de todas as cores resulta branco.

⁵¹Em seus primeiros trabalhos, Newton não elabora a idéia de que o espectro luminoso pode ser dividido em 7 cores principais. O espectro inicialmente descrito por Newton em suas *Optical Lectures* continha 5 cores (vermelho, amarelo, verde, azul e púrpura). Como Newton faz uma analogia entre o número de cores espectrais e a escala musical, introduz mais duas cores no espectro (laranja e índigo) (NEWTON, 1984, p. 543). Sobre esse assunto veja BIERSON, 1972 e TOPPER, 1990.

⁵²Na verdade, a união de luz vermelha com luz verde produz luz amarela. Esse é o processo utilizado nos cinescópios de televisores coloridos, que empregam apenas três cores principais (vermelho, verde e azul) para produzir a sensação de todas as outras.

⁵³Não é verdade que sejam necessárias *todas* as cores do espectro para produzir o branco. Huygens discutiu esse ponto com Newton em duas cartas (COHEN & SCHOFIELD, 1978, pp. 136-47). Huygens defende a possibilidade da existência de branco produzido pela mistura de amarelo e azul espectrais. Newton discorda e comenta que mesmo que se esse branco existisse teria propriedades diferentes do branco solar. Sobre essa discussão veja SHAPIRO, 1980. Do ponto de vista fisiológico Huygens estava correto, em terminologia moderna as luzes azul e amarela são complementares, isto é, quando misturadas resultam luz branca. Veja o artigo de HELMHOLTZ, 1852.

⁵⁴Esse "sensivelmente" é no sentido visual. Newton apresenta experimentos para provar que o branco produzido pela convergência dos raios é igual ao branco solar apenas na resposta às críticas feitas por Hooke à sua teoria (COHEN & SCHOFIELD, 1978, pp. 110-37). Apresenta um experimento bastante interessante no qual os raios decompostos por um prisma atravessam uma lente convergente e convergem para um ponto onde a cor branca é gerada. A diferença desse para o experimento que apresenta em seu artigo é que agora alguns raios coloridos são interceptados por uma roda dentada que gira rapidamente, impedindo que todos os raios estejam presentes ao mesmo tempo no foco da lente. Mesmo assim, quando a roda gira rapidamente observa-se a formação de luz branca no foco da lente. Essa luz branca quando decomposta por um segundo prisma gera cores que nunca são iguais às geradas pelo primeiro prisma. Nota-se a ausência das cores que foram interceptadas pelo primeiro prisma. Para Newton esse experimento mostra que o branco formado no foco da lente convergente é uma impressão visual e não uma mútua destruição de todos os raios coloridos gerando uma luz uniforme. Sendo assim, para Newton, o branco solar também é uma impressão visual pois não difere em nada do branco formado pela mistura de cores. Para afirmar que os dois brancos são iguais Newton faz uso de um argumento metodológico medieval conhecido como Navalha de Occam: não se deve multiplicar as entidades sem necessidade por isso escolhe a hipótese de que os brancos são iguais.

vem ser separados e dispersados em uma forma oblonga numa sucessão ordenada, do Escarlate menos refratado até o Violeta mais refratado. É pela mesma razão que quando olhamos os objetos através de um Prisma, eles aparecem coloridos, pois os Raios diformes, por suas Refrações desiguais, divergem em direção a diferentes regiões da *Retina* e lá expressam as Imagens das coisas coloridas, como no primeiro caso elas fazem à Imagem do Sol sobre a parede. E por essa desigualdade das refrações elas se tornam não apenas coloridas mas também muito confusas e indistintas.

10. Por quê as Cores do *Arco íris* aparecem nas gotas cadentes [p. 3084] de chuva é também evidente a partir disso. Pois as gotas que refratam os Raios dispostos a aparecerem púrpura em maior quantidade para os olhos dos Observadores, refratam os Raios de outros tipos muito menos e os fazem passar ao lado deles; e tais são as gotas no interior do Arco *Primário* e no lado externo do arco *Secundário* ou exterior. Assim aquelas gotas que refratam em maior quantidade os Raios aptos a aparecerem vermelhos em direção ao olho dos Observadores, refratam as dos outros tipos muito mais, de modo a fazê-los passar ao lado dele; e tais são as gotas na parte exterior do Arco *Primário* e parte interior do Arco *Secundário*⁵⁵.

11. Os Fenômenos ímpares de uma infusão de *Lignum Nephriticum*⁵⁶, *folha de ouro*, *fragmentos de vidros coloridos* e alguns outros corpos transparentes coloridos que aparecem em uma posição de uma cor e em outra posição de outra cor, não são mais enigmáticos quando analisados de acordo com essa base⁵⁷. Pois aquelas

são substâncias aptas a refletir um tipo de luz e transmitir outro, como pode ser visto num quarto escuro, iluminado-as com luz similar ou não composta. Pois então elas aparecem apenas daquela cor com a qual foram iluminadas mas em uma posição, mais vívidas e luminosas que em outra, conforme elas sejam mais ou menos dispostas a refletir ou transmitir a cor incidente.

12. A partir daí também aparece a razão de um Experimento inesperado que o Sr. *Hook*, em algum lugar de sua *Micrographia*, relata ter feito com dois recipientes transparentes em forma de cunha, um cheio com um líquido vermelho e o outro com azul: a saber, que ambos individualmente eram suficientemente transparentes, entretanto ambos juntos tornaram-se opacos⁵⁸; pois se um transmite apenas vermelho e o outro apenas azul, nenhum raio pode passar através de ambos⁵⁹.

13. Poderia adicionar mais exemplos dessa natureza mas concluirei com esse geral, que as Cores dos Corpos naturais não têm outra origem senão esta: que eles são variadamente qualificados a refletir um tipo de luz em maior quantidade que outros. E isso experimentei em um Quarto escuro, iluminando esses corpos com luz não composta de diversas cores. Por esse meio pode-se fazer qualquer corpo aparecer de qualquer cor. Eles não tem cor própria, mas sempre aparecem da cor da luz lançada sobre eles, mas no entanto com essa diferença, que eles são mais brilhantes e vívidos na luz de suas próprias cores à luz do dia. *Minium*⁶⁰ apareceu lá indiferentemente de qualquer cor com o qual foi iluminado, mas ainda mais luminoso no vermelho; e da mesma forma, [p. 3085] o *Bise*⁶¹ apareceu indiferentemente de qual-

⁵⁵Newton não foi o primeiro a explicar o arco-íris com base na refração. Descartes já havia proporcionado uma explicação semelhante quando observou que os arco-íris eram produzidos pelas gotas de água da atmosfera e fez experimentos utilizando vasos esféricos cheios de água observados sob a luz solar para estudar as refrações e reflexões da luz solar causadas por superfícies desse tipo (DESCARTES, 1637). Para mais detalhes veja TIEMERSMA, 1988.

⁵⁶Planta cujo nome científico é *Moringa pterygosperma* usada em infusão para o tratamento de pedras nos rins. É relevante indicar que atualmente se sabe que esta substância é fluorescente, emitindo portanto luz diferente da incidente. Se Newton tivesse estudado mais cuidadosamente essa substância, teria encontrado uma exceção ao seu conceito de raios luminosos que nunca alteram suas propriedades.

⁵⁷Esses experimentos já haviam sido discutidos por Boyle em (BOYLE, 1664) pp. 198-212, e estudados por Newton em (Mc GUIRRE e TAMMY, 1983) pp. 466-67.

⁵⁸Em sua *Micrographia* p. 73-5 (HOOKE, 1665), Hooke apresenta um experimento para provar que as outras cores podem ser compostas pela mistura de azul e vermelho. Ele usa dois recipientes de vidro em forma de cunha, um com tintura vermelha de aloes e outro com tintura azul de cobre. Olhando através de diversas espessuras das cunhas Hooke observou várias tonalidades de azul e vermelho que se sobrepunham quando as cunhas deslizavam uma sobre a outra, resultando numa grande variedade de cores. Mas quando sobrepôs o azul mais intenso ao vermelho mais intenso, o conjunto tornou-se opaco.

⁵⁹A explicação dada por Newton é incompleta. Por um vidro azul, passam raios de diferentes cores, mas principalmente os "de maior refrangibilidade". Por um vidro vermelho, passam também raios de diferentes cores, mas predominam os de "menor refrangibilidade". Colocando-se um vidro azul e um vermelho juntos, eles vão ser atravessados por uma parcela da luz branca incidente, pois nenhum deles filtra de modo perfeito uma faixa do espectro correspondente à cor percebida visualmente.

⁶⁰Pigmento de óxido de chumbo, de coloração vermelha usado na fabricação de tintas.

⁶¹Em inglês também é "blue bice", designando um tipo de esmalte de uma cor azul.

quer cor com o qual foi iluminado, mas ainda mais luminoso no azul. E portanto *Minium* reflete Raios de qualquer cor, mas mais abundantemente aqueles dotados de vermelho, e conseqüentemente quando iluminados com luz do dia, isto é, com todos os tipos de Raios misturados promiscuamente, aqueles qualificados com vermelho serão mais abundantes na luz refletida e por sua predominância fazem-no aparecer daquela cor. E pela mesma razão *Bise*, refletindo azul mais abundantemente, aparecerá azul pelo excesso daqueles Raios em sua luz refletida; e o mesmo para os outros corpos. E torna-se claro que essa é a causa inteira e adequada de suas cores porque eles não têm poder de mudar ou alterar as cores de qualquer tipo de Raios que incidem separadamente mas vestem indiferentemente todas as cores com as quais são iluminados.

Essas coisas sendo assim, não pode ser muito discutido se há cores no escuro ou se elas são qualidades dos objetos que vemos, nem se Luz é um Corpo. Pois como Cores são *qualidades* da Luz, tendo seus Raios como seu sujeito inteiro e imediato, como podemos pensar aqueles Raios como *qualidades* também, a menos que uma qualidade possa ser sujeito e sustentáculo de outra, o que de fato é chamá-la de *substância*⁶². Não poderíamos conhecer os Corpos como substâncias a não ser por suas qualidades sensíveis, e como agora encontramos que a Principal delas é devida a alguma outra coisa, temos uma razão igualmente boa para acreditar que aquilo é uma substância também.

Além disso, quem jamais pensou que alguma qualidade fosse um agregado *heterogêneo*, tal como se descobriu que é a Luz? Mas não é tão fácil determinar mais absolutamente o que é a Luz, de que maneira é refratada e por quais modos ou ações ela produz em nossas mentes os Fantasmas⁶³ das Cores. E não misturarei conjecturas com certezas⁶⁴.

⁶²Newton se refere a essa diferenciação aristotélica entre substância e qualidade como maneira de refutar algumas teorias sobre luz nas quais a luz seria uma qualidade que se propaga em uma substância (o éter). Uma qualidade não pode possuir outra qualidade: as qualidades são atributos das substâncias. Portanto, as cores (que são qualidades) devem ser atributos de uma substância (a luz) e não de uma outra qualidade.

⁶³A palavra fantasma era usada como sinônimo de espectro. Veja nota 11.

⁶⁴Na visão de Newton, o estabelecimento das propriedades das cores e da composição da luz branca se fundamentam diretamente em experimentos e não são passíveis de dúvida. Por outro lado, para explicar o mecanismo de refração da luz e as sensações das cores, seria preciso invocar hipóteses incertas.

⁶⁵Newton se enganou quanto ao raio da lente pois três pés equivalem a 90 cm; esse tamanho era muito grande para ser o raio de um lente, nessa época. Newton estava se referindo à distância focal da lente. De fato, utilizando a equação $1/f = 1/p + 1/p'$, verifica-se que se utilizarmos uma lente com distância focal de 3 pés, um objeto colocado a 4 pés da lente terá sua imagem formada a 12 pés da mesma; e um objeto colocado a 5 pés da mesma lente terá sua imagem formada a 7,5 pés da lente.

Revedo o que escrevi, vejo o próprio discurso levar a diversos Experimentos suficientes para seu exame: E portanto não o perturbarei mais, a não ser para descrever um deles que já insinuei.

Em um Quarto escurecido, faça um orifício na janela cujo diâmetro pode convenientemente ser aproximadamente a terça parte de uma polegada, para deixar entrar uma quantidade conveniente de luz Solar: E coloque lá um Prisma claro e sem cor para refratar a luz que entra em direção ao lado mais distante do Quarto que, como disse, será desse modo difundida em uma Imagem oblonga colorida. Então coloque uma *Lente* de [p. 3086] cerca três pés de raio⁶⁵ (suponhamos uma grande lente Objetiva de um telescópio de três pés) à uma distância de cerca de quatro ou cinco pés de lá, através da qual todas aquelas cores possam ser transmitidas juntas e faça-as por sua Refração convergir a uma distância de cerca de dez ou doze pés a partir daí [do prisma]. Se àquela distância você interceptar essa luz com uma folha de papel branco, você verá as cores convertidas em branco novamente por serem misturadas. Mas exige-se que o *Prisma* e *Lente* sejam colocados parados e que o papel no qual as cores são lançadas seja movido para frente e para trás; pois, por tal movimento, você não apenas encontrará a qual distância a brancura é mais perfeita, mas também verá como as cores gradualmente se reúnem e desaparecem em brancura, e após terem se cruzado umas com as outras naquele lugar onde compõem a Brancura, são novamente dissipadas e separadas, e em uma ordem invertida mantêm as mesmas cores que tinham antes de entrarem na composição. Você também pode ver que se alguma das Cores na *Lente* for interceptada, a Brancura será mudada nas outras cores. E portanto, para que a composição da brancura seja perfeita, deve ser tomado cuidado para que nenhuma cor incida além da

Lente.

No desenho anexo desse Experimento, ABC indica o Prisma colocado com a base voltada para o leitor perto do orifício F da janela EG. Seu ângulo vertical ACB pode ser convenientemente cerca de 60 graus: MN indica a *Lente*. Sua largura é de 2½ ou 3 polegadas. SF é uma das linhas retas nas quais se pode conceber que os Raios diformes fluem sucessivamente do Sol. FP e FR são dois daqueles Raios, refratados desigualmente, que a *Lente* faz convergir em direção a Q, e após a intersecção divergem novamente. EHI é o papel, a diversas distâncias, no qual as cores são projetadas; as quais em Q constituem a *Brancura* mas são *Vermelhas* e *Amarelas* em R, r e ρ e *Azul* e *Púrpura* em P, p e π . [p. 3087].

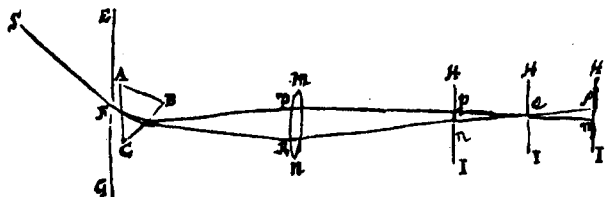


Figura 5. Desenho do artigo de Newton (1672), mostrando experimento de recomposição da luz branca a partir das cores produzidas pelo prisma. A luz do Sol atravessa um fenda e passa por um prisma ABC. O espectro produzido passa por uma lente mn que concentra a luz do ponto Q. Deslocando-se um papel branco HI na região próxima de Q, pode-se notar que as cores vão se reunindo, até formar uma pequena mancha branca em Q, e depois se separam novamente.

Se você avançar mais além, para testar a impossibilidade de mudar qualquer cor não composta (como declarei nas Proposições terceira e décima terceira), é necessário que a Sala seja feita muito escura, para evitar que alguma luz espalhada, misturando-se com a cor, a perturbe e extravie, tornando-a composta, contrariamente ao objetivo do Experimento. Exige-se também que haja uma separação das Cores mais perfeita de que a que pode ser feita pela Refração de um único Prisma, da maneira descrita acima e, não será difícil fazer tal

separação adicional para aqueles que considerem as leis descobertas da Refração. Mas se for feita a tentativa com cores não separadas completamente, devem ser toleradas mudanças proporcionais à mistura. Assim, se luz Amarela composta incidir sobre *Bise* Azul, o *Bise* não aparecerá perfeitamente amarelo mas um pouco verde porque existem na mistura amarela muitos raios dotados de verde, e Verde sendo menos afastado da cor azul usual do *Bise* que amarelo, é a mais abundantemente refletida por ele⁶⁶.

Da mesma maneira, se alguma das cores Prismáticas, suponhamos o Vermelho, for interceptada com o propósito de testar a impossibilidade declarada de reproduzir aquela Cor das outras que são transmitidas é necessário que as cores sejam muito bem separadas antes que o vermelho seja interceptado, ou que, junto com o vermelho, as cores vizinhas nas quais qualquer vermelho esteja espalhado secretamente (isto é, o amarelo e talvez o verde também) sejam interceptadas, ou senão, que seja feita uma concessão para o surgimento de uma certa quantidade de vermelho do verde amarelo, que poderia ter sido difundida, e misturada e espalhada naquelas cores. E se essas coisas foram observadas a nova Produção do Vermelho, ou de qualquer cor interceptada, será encontrada impossível.

Isto, concebo, é suficiente para uma Introdução aos Experimentos desse tipo: os quais, se alguém da *R. Society* for tão curioso ao ponto de realizá-los, ficaria muito satisfeito de ser informado sobre seu eventual sucesso. Para que, se alguma coisa parece ser defeituosa ou contrariar esse relato possa ter uma oportunidade de dar instruções adicionais sobre ele, ou reconhecer meus erros, se cometi algum⁶⁷.

Até aqui essa Culta e muito Engenhosa Carta, que tendo sido entregue por aquela *Companhia Ilustre* para a consideração de alguns de seus Membros bem versados neste argumento, o Leitor possivelmente será infor-

⁶⁶Esse experimento mostra a dificuldade prática em testar a teoria de Newton. Como a reflexão não deve mudar as cores, a previsão teórica seria a de que um papel pintado de azul, iluminado no escuro com luz amarela, teria que aparecer amarelo. No entanto, ele pode parecer verde - o que, aparentemente, seria uma refutação da teoria. Mais uma vez, o conceito de cor simples ou pura é fundamental para interpretar os experimentos.

⁶⁷Após a publicação do artigo de Newton, diversos autores escreveram à Royal Society indicando que os experimentos de Newton não davam os resultados indicados por ele, ou propondo outros experimentos que contrariavam a teoria de Newton: Lucas (COHEN & SCHOFIELD, 1978, pp. 163-76), Huygens (COHEN & SCHOFIELD, 1978, pp. 136-47), Hooke (COHEN & SCHOFIELD, 1978, pp. 110-35), Pardies (COHEN & SCHOFIELD, 1978, pp. 79-92 e 97-109). Posteriormente, para resolver a questão experimental, Robert Hooke foi encarregado de repetir diante da Royal Society os experimentos de Newton, e conseguiu reproduzi-los sem problemas (BIRCH 1757, vol. 3, pp. 309, 313-4). Apesar de aceitar como corretos os experimentos, Hooke continuou a negar a teoria de Newton.

mado em um outro *Tratado* de algum relato dado sobre esse Discurso. [p. 3088]

Referências

1. ALONSO, M. e FINN, E. J. *Física: um curso universitário*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1972.
2. BACON, F. *Novum Organon*. São Paulo: Abril 1972. (*Os Pensadores*).
3. BECHLER, Zev. Newton's search for a mechanistic model of colour dispersion: a suggested interpretation. *Archive for History of Exact Sciences* 11: 1-37, 1973.
4. BIERSON, George. Why did Newton see indigo in the spectrum?. *American Journal of Physics* 40: 526-33, 1972.
5. BIRCH, Thomas. *The history of the Royal Society of London*. London: A. Millar, 1757.
6. BOYLE, Robert. *Experiments and Considerations Touching Colours. First occasionally written, among some other Essays to a Friend; and now suffer'd to come abroad as the Beginning of an Experimental History of Colours*. London, 1664; Reedição: New York: Johnson Reprint, 1964.
7. COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978.
8. *The compact edition of the Oxford English Dictionary*. Oxford: Oxford University Press, 1985.
9. DESCARTES, René. *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la verité dans les sciences. Plus la dioptrique. Les meteores. Et la geometrie. Qui sont des essais de cete methode*. Leyde: I. Maire, 1637. Reproduzido em: *Oeuvres de Descartes*. Ed. Charles Adam e Paul Tannery. Paris: Vrin, 1964-74. Vol. 6.
10. GRIMALDI, Francesco Maria. *Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride, aliisque annexis libri II*. Bononiae, 1665. Reproduzido parcialmente em: RONCHI, Vasco (ed.). *Scritti di ottica*. Milano: Edizioni il Polifilo, 1968, pp. 463-501.
11. HALL, A. Rupert. Beyond the fringe: diffraction as seen by Grimaldi, Fabri, Hooke and Newton. *Notes and Records of the Royal Society* 41: 111-43, 1987.
12. HELMHOLTZ, Hermann von. On the theory of compound colors. *Philosophical Magazine* [4] 4:, 519-534, 1852.
13. HOOKE, Robert. *Micrographia or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses. with observations and inquires thereupon*. London: J. Martyn and J. Allestry, 1665. Reimpressão: New York: Dover, 1961.
14. LOHNE, John. Thomas Harriot (1560-1621), the Thycho Brahe of optics. *Centaurus* 6: 113-21, 1959.
15. LOHNE, J. A. Experimentum Crucis, *Notes and Records of the Royal Society* 23:, 169-99, 1968.
16. Mc GUIRRE, J. E. e TAMNY, Martin. *Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
17. NEWTON, Isaac. *The correspondence of Isaac Newton*. Ed. H. W. Turnbull. 7 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977.
18. NEWTON, Isaac. A letter of Mr. Isaac Newton, professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; containing his new theory about light and colors; sent by the author to the publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72; in order to be communicated to the R. Society. *Philosophical Transactions of the Royal Society* (80): 3075-87, 1672. Reproduzido em: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978, pp. 47-59.
19. NEWTON, Isaac. *The optical papers of Isaac Newton*. Ed. Alan E. Shapiro. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. Vol 1: *The optical lectures (1670-1672)*.
20. NEWTON, Isaac. *Opticks or, a treatise of the reflections, refractions, inflexions and colours of light*. London, 1704; Reeditado: New York: Dover, 1952. A tradução integral dessa obra, feita pelo prof. André K. T. Assis, foi publicada pela EDUSP.
21. SABRA, A. I. *Theories of light from Descartes to Newton*. London: Cambridge University Press, 1981.
22. SHAPIRO, Alan E. The evolving structure of Newton's theory of white light and color. *Isis* 71: 211-35, 1980.

23. SHIRLEY, J. W. An early experimental determination of Snell's law. *American Journal of Physics* **19**: 507-8, 1951.
24. TIEMERSMA, Douwe. Methodological and theoretical aspects of Descarte's treatise on the rainbow. *Studies in History and Philosophy of Science* **19**: 347-364, 1988.
25. TOPPER, David. Newton on the number of colours in the spectrum. *Studies in History and Philosophy of Science* **21**: 269-79, 1990.
26. WESTFALL, Richard S. *Never at rest, a biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. Em português há uma tradução resumida desta biografia: *A vida de Isaac Newton*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1995.