

**A teoria das cores de Newton:
um estudo crítico do Livro I do**

Opticks

28556 (15/1038)

Cibelle Celestino Silva

orientador: Roberto de Andrade Martins

Este exemplar corresponde à redação final da tese de mestrado defendida pela aluna Cibelle Celestino Silva e aprovada pela Comissão Julgadora.

Roberto de Andrade Martins

16/08/96

Dissertação apresentada ao Instituto de Física "Gleb Wataghin"
como parte dos requisitos necessários
para obtenção do título de Mestre em Física. Campinas, julho de 1996.



INSTITUTO DE FÍSICA
GLEB WATAGHIN

PARECER DE APROVAÇÃO
DEFESA DE TESE DE MESTRADO
CIBELLE CELESTINO SILVA

DATA: 26.07.96

BANCA EXAMINADORA:

- Prof. Dr. ROBERTO DE ANDRADE MARTINS (Orientador)

- Prof. Dr. MAURÍCIO PIETROCOLA PINTO DE OLIVEIRA

- Prof. Dr. JOSÉ JOAQUIM LUNAZZI

Ars longa, vita brevis.

Hipócrates.

Resumo

Esta dissertação analisa a estrutura e fundamentação da teoria das cores de Newton através de um estudo detalhado das proposições e dos experimentos do Livro I do *Opticks*, publicado em 1704. A análise aqui apresentada leva em conta outros estudos de Newton sobre óptica, tais como seu caderno de anotações de 1664-65, o artigo em que Newton publicou pela primeira vez a sua teoria em 1672 nas *Philosophical Transactions of the Royal Society*, as críticas que Hooke, Pardies, Huygens e outros pesquisadores fizeram a esse artigo, e as respostas de Newton a essas críticas. A dissertação analisa os argumentos usados por Newton e mostra que nem sempre ele seguiu o método indutivista que se propunha seguir. Contrariamente à visão tradicional que via nesse trabalho de Newton um uso exemplar do método experimental, a dissertação aponta vários problemas dos experimentos e da argumentação de Newton. Em particular, mostra que ele não apresentou (nem poderia ter apresentado) uma prova experimental da composição da luz branca solar.

Abstract

This dissertation analyses the structure and foundation of Newton's theory of colours through a detailed study of the propositions and experiments of Book I of *Opticks*, published in 1704. The analysis presented here takes into account some other of Newton's studies on optics, including his Notebook (1664-65), the paper published in 1672 in the *Philosophical Transactions of the Royal Society*, where Newton made public for the first time his theory, the critical remarks by Hooke, Pardies, Huygens and other researchers to that paper, and Newton's answers to his critics. The dissertation analyses the arguments used by Newton and shows that sometimes he failed to follow the inductivist method the tried to follow. The dissertation points out several difficulties behind Newton's experiments and arguments. In particular, it is shown that he did not present (nor could have presented) an experimental proof of the composition of the white light from the Sun.

A Vanda.

Agradeço ao prof. Roberto Martins pela dedicação, paciência e por tudo que aprendi nesses três anos de convivência.

Agradeço ao prof. André Assis, pela atenção e incentivo nos momentos difíceis. Agradeço a todos os amigos que, de uma maneira ou outra, me ajudaram bastante.

Finalmente, agradeço a meus pais que tudo fizeram para que eu chegasse até aqui.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
<i>OPTICKS</i> , LIVRO I, PARTE I	6
PROPOSIÇÃO I - LUZES QUE DIFEREM EM COR TAMBÉM DIFEREM EM GRAUS DE REFRANGIBILIDADE	6
<i>Experimento 1. Quando um papel pintado de duas cores é visto através de um prisma, as partes aparecem separadas.</i>	6
<i>Experimento 2. Os raios vermelhos e azuis são focalizados por uma lente em pontos diferentes.</i>	7
PROPOSIÇÃO II - A LUZ DO SOL CONSISTE EM RAIOS COM DIFERENTES REFRANGIBILIDADES	10
<i>Experimento 3. Um feixe de luz solar atravessa um prisma - os resultados experimentais estão em desacordo com as leis da óptica aceitas.</i>	11
<i>Posição de desvio mínimo.</i>	12
<i>Incidência do feixe perpendicularmente à parede</i>	19
<i>A precisão das medidas de Newton</i>	20
<i>Forma do espectro luminoso.</i>	22
<i>Experimento 4. A luz refletida pelas nuvens é refratada por um prisma.</i>	24
<i>Experimento 5. A luz é refratada por dois prismas cruzados - o espectro consiste em imagens circulares sobrepostas - a penumbra do espectro é devida ao tamanho finito do feixe e pode ser eliminada pelo uso de lentes.</i>	25
<i>Experimento 6. Uma fenda é usada para selecionar a luz de uma única cor do espectro - experimentos com tal luz.</i>	28
<i>Papéis do "experimentum crucis"</i>	29
<i>Críticas ao "experimentum crucis"</i>	31
<i>Problemas metodológicos.</i>	32
<i>Experimento 7. Uma metade de uma linha ou papel é iluminada por luz espectral vermelha e a outra metade com luz espectral violeta - a linha ou papel é visto através de um prisma. Dois espectros sobrepostos (vermelho de um sobre o violeta do outro) são vistos através de um prisma.</i>	33
<i>Experimento 8. Uma página impressa é iluminada por um espectro e vista através de um prisma.</i>	36
<i>Experimento 9. Separação de cores pela reflexão interna em um prisma.</i>	36
<i>Experimento 10. Algumas cores são transmitidas e outras refletidas pela interface de um paralelepípedo formado por dois prismas - as luzes refletida e a refratada são examinadas por um prisma.</i>	38
<i>Resumo dos argumentos sobre a Proposição II.</i>	40

<i>É a luz branca uma mistura de raios? As críticas de Hooke</i>	41
PROPOSIÇÃO III - A LUZ DO SOL CONSISTE EM RAIOS DIFERINDO EM REFLEXIBILIDADE E AQUELES RAIOS QUE SÃO MAIS REFLEXÍVEIS SÃO MAIS REFRANGÍVEIS.	45
PROPOSIÇÃO IV - SEPARAR UNS DOS OUTROS OS RAIOS HETEROGÊNEOS DA LUZ COMPOSTA.	46
<i>Experimento 11.</i> Uso de lente convergente para melhorar a definição do espectro - conselho ao experimentador.....	47
PROPOSIÇÃO V - LUZ HOMOGÊNEA É REFRACTADA REGULARMENTE SEM QUALQUER DILATAÇÃO, DIVISÃO OU ESPEDAÇAMENTO DOS RAIOS, E A VISÃO CONFUSA DOS OBJETOS VISTOS SOB LUZ HETEROGÊNEA ATRAVÉS DE CORPOS REFRACTORES SURGE DA DIFERENTE REFRANGIBILIDADE DOS VÁRIOS TIPOS DE RAIOS.	48
<i>Experimento 12.</i> Feixe de uma única cor é separado do espectro através de uma fenda circular e atravessa um prisma - a imagem é circular.....	49
<i>Experimento 13.</i> Um pedaço de papel é iluminado sucessivamente por luz homogênea e por luz heterogênea e visto através de um prisma.....	49
<i>Experimento 14.</i> Moscas e objetos semelhantes são iluminados sucessivamente por luz homogênea e heterogênea e vistos através de um prisma.....	49
PROPOSIÇÃO VI - O SENO DA INCIDÊNCIA DE CADA RAIOS CONSIDERADO SEPARADAMENTE ESTÁ PARA SEU SENO DA REFRAÇÃO EM UMA RAZÃO DADA.	50
PROPOSIÇÃO VII - A PERFEIÇÃO DOS TELESCÓPIOS É IMPEDIDA PELAS REFRANGIBILIDADES DIFERENTES DOS RAIOS DE LUZ.	52
<i>O telescópio refletor</i>	53
OPTICKS, LIVRO I, PARTE II	56
PROPOSIÇÃO I - O FENÔMENO DAS CORES NA LUZ REFRACTADA OU REFLETIDA NÃO É CAUSADO POR NOVAS MODIFICAÇÕES DA LUZ IMPRIMIDAS VARIADAMENTE, DE ACORDO COM AS VÁRIAS TERMINAÇÕES DA LUZ E SOMBRA.....	56
<i>Experimento 1.</i> Mudanças nos limites do feixe de luz refratado por um prisma não produzem mudanças nas cores.	56
<i>Experimento 2.</i> Um feixe de luz solar refratado por um prisma e focalizado por uma lente sobre um papel - rotações do papel em torno de sua posição inicial produzem mudanças nas cores.	57
<i>Experimento 3.</i> Um feixe de luz solar largo passa através de um prisma e incide sobre um pedaço de papel e aparece branco - rotações do papel em torno de sua posição original produzem mudanças nas cores embora não haja nenhuma mudança na refração, nas sombras ou na luz.....	58

Experimento 4. Uma bolha de sabão protegida do vento, mudará lentamente suas cores sem qualquer mudança na posição de qualquer objeto - as cores não dependem das sombras..... 59

PROPOSIÇÃO II - TODA LUZ HOMOGÊNEA TEM SUA COR PRÓPRIA CORRESPONDENTE A SEU GRAU DE REFRAINGIBILIDADE, E ESSA COR NÃO PODE SER MUDADA POR REFLEXÕES E REFRAÇÕES. 59

Experimento 5. Comentários sobre os Experimentos 12 e 14 do Livro I, Parte I. 60

Experimento 6. Objetos diferentes vistos em várias luzes homogêneas apareceram da mesma cor da luz, embora alguns mais brilhantes que outros - reflexão não pode mudar a cor da luz - se a luz solar fosse homogênea todos os objetos apareceriam da mesma cor. 60

PROPOSIÇÃO III - DEFINIR A REFRAINGIBILIDADE DOS VÁRIOS TIPOS DE LUZ HOMOGÊNEA CORRESPONDENDO ÀS VÁRIAS CORES...... 62

Experimento 7. Os limites entre as cores do espectro produzido sobre um papel foram marcados - as distâncias desses limites até a extremidade do espectro além do vermelho estão em razão com certas notas musicais. 62

Experimento 8. A luz que emerge paralela à luz branca incidente após qualquer número de refrações é branca - caso contrário é colorida..... 63

PROPOSIÇÃO IV- PODEM SER PRODUZIDAS POR COMPOSIÇÃO CORES QUE SEJAM SEMELHANTES ÀS CORES DA LUZ HOMOGÊNEA QUANTO À APARÊNCIA DA COR, MAS NÃO QUANTO À IMUTABILIDADE DA CORES, CONSTITUIÇÃO DA LUZ. E QUANTO MAIS COMPOSTAS SEJAM ESSAS CORES TANTO MENOS PLENAS E INTENSAS ELAS SERÃO, E POR MUITA COMPOSIÇÃO ELAS PODEM SER DILUIDAS E ENFRAQUECIDAS ATÉ CESSAREM, E A MISTURA SE TORNA BRANCA OU CINZA. PODE HAVER TAMBÉM CORES PRODUZIDAS POR COMPOSIÇÃO QUE NÃO SÃO COMPLETAMENTE SEMELHANTES A QUALQUER COR DE LUZ HOMOGÊNEA. 64

Cores simples e compostas...... 65

As teorias dualísticas das cores 67

PROPOSIÇÃO V - BRANCO E TODAS AS CORES CINZA ENTRE O BRANCO E O PRETO PODEM SER COMPOSTAS DE CORES, E A BRANCURA DA LUZ DO SOL É COMPOSTA DE TODAS AS CORES PRIMÁRIAS MISTURADAS EM UMA DEVIDA PROPORÇÃO. 69

Experimento 9. Um papel branco sobre uma parede distante iluminado por luz espectral aparece branco - se mantido mais próximo de qualquer parte do espectro aparece da cor daquela parte - se uma parte do espectro for interceptada, o papel aparecerá das cores remanescentes. 70

Experimento 10. Um espectro focalizado por uma lente sobre um papel produz imagem branca apenas quando bem focalizado e uma imagem colorida quando não focalizado - interceptando qualquer cor antes da lente, o branco se degenera em

cores - variações desse experimento - uso de um pente para interceptar certas cores antes da lente - persistência da visão - recomposição da luz branca pelo uso de um segundo prisma.....	70
<i>Experimento 11.</i> Exame do espectro através de um segundo prisma - luz branca é produzida à distância adequada entre o segundo prisma e o espectro - uso de um pente para interceptar certas cores.....	72
<i>Experimento 12.</i> Um pente é colocado imediatamente após um grande prisma sobre o qual um feixe largo de luz branca solar incide - é produzida uma série de espectros paralelos - o movimento do pente causa o movimento dos espectros - o movimento rápido do pente produz a impressão da cor branca - movendo-se o papel para muito longe do prisma e do pente, o espectro desaparece e aparece a cor branca - interceptando parte dessa luz com um pente, a brancura desaparece.....	72
<i>Experimento 13.</i> O branco pode ser produzido pela superposição dos espectros produzidos por dois prismas adjacentes - variações desse experimento.....	73
<i>Experimento 14.</i> Espuma de sabão vista de perto aparece colorida, mas vistas de longe ela aparece branca.....	74
<i>Experimento 15.</i> Pigmentos coloridos não refletem luz de sua própria cor tão bem quanto uma superfície branca - logo a mistura de pigmentos não produz um branco perfeito - experimentos com misturas de pigmentos.....	74
<i>As cores dos objetos</i>	75
<i>A composição da luz branca por duas cores</i>	76

PROPOSIÇÃO VI - SABER A COR DA COMPOSIÇÃO EM UMA MISTURA DE CORES PRIMÁRIAS, SENDO DADAS A QUANTIDADE E QUALIDADE DE CADA UMA.....	78
--	----

PROPOSIÇÃO VII - TODAS AS CORES DO UNIVERSO FEITAS PELA LUZ E QUE NÃO DEPENDEM DO PODER DA IMAGINAÇÃO, OU SÃO CORES DA LUZES HOMOGÊNEAS OU COMOPOSTAS POR ELAS CONCORDANDO COM A REGRA DO PROBLEMA ANTERIOR PRECISAMENTE OU MUITO APROXIMADAMENTE.....	80
--	----

PROPOSIÇÃO VIII - EXPLICAR AS CORES FEITAS PELOS PRISMAS ATRAVÉS DAS PROPRIEDADES DESCOBERTAS DA LUZ.....	80
<i>Experimento 16.</i> O uso de luz refletida pelas nuvens ao invés de luz solar.....	82

PROPOSIÇÃO IX - EXPLICAR AS CORES DO ARCO-ÍRIS PELAS PROPRIEDADES DESCOBERTAS DA LUZ.....	83
---	----

PROPOSIÇÃO X - EXPLICAR AS CORES PERMANENTES DOS CORPOS NATURAIS PELAS PROPRIEDADES DESCOBERTAS DA LUZ.....	86
<i>Experimento 17.</i> Experimentos sobre reflexão e transmissão de luz homogênea por objetos coloridos - filtros feitos com líquidos azuis e vermelhos - juntos eles bloqueiam toda a luz.....	86

PROPOSIÇÃO XI - COMPOR UM FEIXE DE LUZ DA MESMA COR E NATUREZA QUE UM FEIXE DIRETO DE LUZ DO SOL PELA MISTURA DE LUZES COLORIDAS E ASSIM TESTAR A VERDADE DAS PROPOSIÇÕES ANTERIORES.	88
CONCLUSÃO.....	91
APÊNDICE 1 - A "NOVA TEORIA SOBRE LUZ E CORES" DE ISAAC NEWTON: UMA TRADUÇÃO COMENTADA.....	95
APÊNDICE 2 - DESVIO DA LUZ POR UM PRISMA: CASO GERAL.....	110
APÊNDICE 3 - A DEMONSTRAÇÃO DE NEWTON PARA A FORMA CIRCULAR DA IMAGEM PRODUZIDA PELO PRISMA.....	115
APÊNDICE 4 - A DEMONSTRAÇÃO TEÓRICA DE NEWTON PARA A LEI DA REFRAÇÃO.....	119
APÊNDICE 5 - HISTÓRIA DA CIÊNCIA E ENSINO, UMA ARMADILHA PERIGOSA	122
BIBLIOGRAFIA	126

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 estudado por Newton em meados do século XVII.

As primeiras contribuições de Newton para a óptica - a descoberta da refração diferenciada sofrida por raios¹ de cores diferentes e a teoria das cores - o tornaram conhecido no meio científico do século XVII somente em fevereiro de 1672 com a publicação de seu artigo "Nova teoria sobre luz e cores" nas *Philosophical Transactions* da Royal Society de Londres².

Como o próprio Newton informou em 1672, ele não foi o primeiro a observar as cores produzidas por um prisma. De fato, 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 era um fenômeno conhecido, tendo sido discutido por pelo menos quatro filósofos naturais em tratados ópticos: 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). No entanto, esses estudos eram principalmente qualitativos, sem aprofundamento matemático e geométrico.

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 apresentam um simples experimento de dispersão da luz branca por um prisma como evidência de que a luz branca é uma mistura de raios coloridos.

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. 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.

Em 1672, Newton complementou a "demonstração" da composição da luz branca com seu *experimentum crucis*. Nesse experimento fez a luz solar passar por um prisma e seu espectro colorido incidir num anteparo com um pequeno furo que permitia a passagem de um feixe de luz de uma única cor; esse feixe atravessou um segundo prisma e, após ser refratado por ele, incidiu num segundo anteparo. Girando o primeiro prisma foi possível selecionar a cor a ser refratada pelo segundo. Newton observou que o segundo prisma não produzia novas mudanças nos raios coloridos e que raios de cores diferentes eram refratados de ângulos diferentes.

Esses dois experimentos podem parecer conclusivos; mas há várias dificuldades no estabelecimento da teoria de Newton. O problema da formação do espectro colorido pode ser resumido da seguinte maneira: ou as cores são *produzidas* pelo prisma ou são propriedades intrínsecas dos raios que são apenas *separados* pelo prisma. Na primeira

¹ Na realidade os raios de luz não são coloridos. Segundo Newton, eles possuem "um Poder ou Disposição para perturbar uma Sensação dessa ou daquela Cor" (*Opticks*, p. 124). No entanto, o próprio Newton se refere aos raios como coloridos. Neste trabalho seguiremos usando a mesma terminologia.

² NEWTON 1672a. Por se tratar de um artigo de grande importância para a história da óptica, fizemos uma tradução comentada que aparece como Apêndice I desta dissertação.

hipótese considerada, a luz branca é homogênea e as cores são perturbações produzidas pela passagem da luz através do prisma. Na segunda (a que atualmente aceitamos), a luz é uma mistura heterogênea de raios coloridos que possuem a propriedade de serem refratados de acordo com sua cor.

Segundo Newton, o prisma simplesmente separa a luz branca em seus raios componentes de acordo com suas refrangibilidades³ sem produzir nenhuma mudança no feixe de luz branca. Como prova disso, Newton usou o *experimentum crucis* mostrando que raios de uma mesma cor não são modificados pela refração e que mantêm a mesma refrangibilidade, logo a luz branca não poderia ser homogênea.

A princípio esse argumento pode parecer correto, mas algumas outras perguntas podem ser feitas. Por que o primeiro prisma teria o mesmo efeito na luz branca que o segundo na luz colorida? O que nos garante que o primeiro prisma não produz alterações na luz branca que se conservam nas refrações seguintes?

Para nós, que fomos educados na tradição da teoria newtoniana, essa dúvida pode parecer tola. Para mostrar que não é, uma comparação pode ser útil. A luz do Sol ou a produzida por uma fonte incandescente não é polarizada. No entanto, ao atravessar um cristal de calcita, esse cristal produz dois feixes com polarizações planas ortogonais. Quando esses feixes são passados novamente por um cristal de mesmo tipo, na mesma posição, suas polarizações se conservam e eles não são divididos novamente em outros feixes⁴. Quando os feixes polarizados incidem sobre o cristal girado de 45°, dois novos feixes com polarizações ortogonais são novamente produzidos. Temos aí, portanto, propriedades que, segundo acreditamos, não existiam inicialmente na luz incidente mas que são *produzidas* e *mantidas* após a primeira divisão do feixe no cristal birrefringente. Como sabermos se com as cores não ocorre algo semelhante?

O estudo histórico da questão nos mostra que o desenvolvimento e aceitação da hipótese de composição da luz branca foi altamente problemático⁵. Alguns coetâneos de Newton acharam que seus argumentos eram inconclusivos e que não respondiam a essas e a outras perguntas. Como veremos ao longo desse trabalho, outros elementos experimentais e teóricos são necessários para se decidir entre as possíveis hipóteses, pois os argumentos experimentais usados por Newton em 1672 (e os encontrados atualmente nos livros-texto) são insuficientes para embasar a hipótese de composição da luz branca. Os livros-texto usados atualmente não apresentam uma discussão detalhada da questão, afirmando a composição da luz como verdade inquestionável.

Logo após a publicação do artigo de Newton em 1672, várias pessoas apresentaram críticas à sua hipótese, entre elas o padre Pardies, Hooke e Huygens. Essas críticas questionaram os resultados apresentados por Newton e a sua interpretação desses resultados, principalmente a afirmação de que a luz branca é uma mistura heterogênea de raios com cores e refrangibilidades diferentes.

A polêmica causada por seu primeiro artigo fez com que Newton se calasse sobre a óptica por quase 30 anos. Somente em 1704, após a morte de seu maior rival, Robert Hooke, Newton finalmente publicou sua teoria completa no livro *Opticks*. O impacto do *Opticks* praticamente se igualou ao do causado pelos *Principia*, nem tanto por ser uma

³ Newton 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. Ver NEWTON, *Opticks*, p. 2.

⁴ Newton discutiu esse problema nas Questões 25 e 26 do *Opticks*, p. 354-61.

⁵ Uma boa obra de referência sobre a história da óptica no período é SABRA, *Theories of light from Descartes to Newton*.

obra revolucionária como esta última, mas por ter sido escrita em inglês, exigir menor conhecimento matemático do que os *Principia*, utilizar uma grande quantidade de argumentos experimentais e ser acessível ao grande público.

Justamente por ser uma obra de fácil acesso e de leitura mais agradável o *Opticks* se mantém como uma obra que desperta grande interesse até nossos dias. A obra pode ser apreciada tanto por seus aspectos físicos quanto filosóficos. Contém uma ampla discussão de tópicos da óptica - associação entre cor e refrangibilidade, teoria das cores, interferência e difração e, até mesmo, discussões sobre mecânica - existência de um éter universal, ação de forças à distância - além de ser considerada um modelo de rigor experimental.

No entanto, no que concerne ao pensamento científico de Newton, o *Opticks* não trouxe grandes novidades pois seu conteúdo já estava presente em outros trabalhos newtonianos feitos antes mesmo de 1672. O conteúdo do *Opticks* se apresentou como novidade apenas para o público em geral da época que até então não havia tido oportunidades de conhecer a totalidade do trabalho óptico de Newton.

Os primeiros experimentos que fez com prismas e as primeiras tentativas de explicar os fenômenos observados podem ser encontrados nas anotações de Newton do período entre 1664 e 1665. Os cadernos de anotações de Newton e seu ensaio *Of Colours* foram publicados somente em 1983⁶. Além de observações relativas às cores dos objetos podemos encontrar também diversas observações sobre cores de soluções químicas e sobre os mecanismos da visão. Em um desses experimentos, Newton observou através de um prisma um pedaço de linha vermelho amarrado a um outro pedaço de linha azul e viu que a emenda entre as linhas aparecia quebrada. Explicou a separação aparente dos fios dizendo que os raios azuis eram mais refratados que os vermelhos, isso porque se moveriam mais lentamente que os raios responsáveis pela cor vermelha. Essa explicação provavelmente foi inspirada em Descartes que associava a cor dos raios de luz com a velocidade de rotação dos glóbulos dos éter.

Newton escreveu pela primeira vez de uma maneira sistemática suas idéias básicas sobre óptica no ensaio de 1666 intitulado *Of Colours* que não foi publicado na época. Esse ensaio contém o primeiro registro das observações de Newton sobre o espectro produzido pela passagem de luz solar através de um prisma, constituindo uma versão preliminar do experimento apresentado em seu artigo de 1672. Nesse ensaio podemos encontrar também uma breve descrição do experimento que viria a ser o *experimentum crucis* do artigo de 1672.

Esses e vários outros experimentos não estão expostos no *Of Colours* com o mesmo rigor geométrico com que estão presentes em suas *Optical lectures*. Essa obra engloba um conjunto de aulas dadas por Newton entre 1670 e 1672 enquanto professor Lucasiano em Cambridge.

O professor Lucasiano devia ministrar uma aula de cerca de uma hora por semana e depositar anualmente pelo menos dez dessas aulas na biblioteca universitária para uso público. Newton cumpriu suas obrigações com um atraso de cerca de quatro anos, quando entregou na biblioteca um conjunto de trinta e duas aulas intitulado *Optica* e manteve em seu poder uma versão menor intitulada *Lectiones opticae*.⁷

⁶ Mc GUIRRE & TAMMY (eds.) *Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook*. Nesta dissertação, essa obra será citada como *Notebook*.

⁷ Ambas foram publicadas e traduzidas em 1984 por Alan E. Shapiro: NEWTON, *The optical papers of Isaac Newton. The optical lectures (1670-72)*. Nesta dissertação, essa obra será citada como *Optical lectures*.

Nessa obra, Newton discutiu com grande aprofundamento geométrico questões como a reflexão e refração da luz por placas paralelas, lentes esféricas e não esféricas, a cor dos objetos, a refrangibilidade dos raios coloridos, a composição da luz branca, a divisão musical do espectro. O resultado dessa profunda reflexão pode ser facilmente percebido no *Opticks*.

Estudos feitos para datar os manuscritos entregues por Newton indicam que a primeira versão das *Optical lectures* (as *Lectiones opticae*) estava completa em 1671, quando a versão destinada à publicação, a *Optica*, começou a ser revisada. Em fevereiro de 1672 essa obra estava essencialmente pronta quando Newton enviou seu artigo para a Royal Society.⁸

Como já foi dito, após a publicação do artigo de 1672, o trabalho de Newton tornou-se alvo de uma série de discussões que fizeram com que ele adiasse a publicação de sua teoria definitiva por muito tempo. Essas discussões não serviram apenas para adiar a publicação da teoria: ela amadureceu com as discussões. Na sua versão final, Newton tornou mais claros conceitos como os de cor simples e composta, resultado das discussões com Hooke. Como resultado das discussões com Huygens, restringiu sua teoria de composição da luz branca apenas à luz solar, deixando assim de valer para todo tipo de luz branca.

Uma breve comparação entre as obras *Optical lectures* e *Opticks* nos mostra que os elementos essenciais e o suporte experimental da teoria são praticamente iguais nas duas obras, exceto que no *Opticks* existe uma discussão sobre difração e uma série de Questões (adicionadas na segunda edição, em 1717) que discutem questões polêmicas como, por exemplo, a existência de forças à distância. O que as faz diferir radicalmente é a maneira como a teoria é apresentada. As pesadas demonstrações geométricas presentes nas *Optical lectures* não aparecem no *Opticks*; além disso, a apresentação da teoria neste último é bastante formal e segue os passos de um tratado matemático.

Podemos perceber um grande zelo por parte de Newton ao apresentar uma grande variedade de experimentos para provar uma mesma proposição e ao descrevê-los com bastante cuidado e clareza. Essa multiplicidade de experimentos, inventados e aperfeiçoados por Newton com o passar dos anos, mostra o resultado do seu amadurecimento e também o efeito de críticas que ele recebeu. É exatamente esse excesso de cuidado que torna a obra extremamente clara e interessante para o público em geral.

Nesta dissertação será feita uma análise do caminho seguido por Newton para chegar às proposições estabelecidas no Livro I do *Opticks*, no qual estabeleceu pontos centrais de sua teoria - a refrangibilidade dos raios, a relação entre cor e refrangibilidade, a imutabilidade dos raios de luz, composição da luz branca, as cores dos objetos e outros. O objetivo não é estabelecer uma seqüência cronológica dos experimentos e proposições, mas sim entender como se deu o desenvolvimento lógico da teoria. Isso será feito através do estudo crítico do *Opticks*, comparando seu conteúdo com o artigo de 1672 e com os vários manuscritos newtonianos editados e de sua correspondência sobre óptica. Como veremos, as críticas recebidas após a publicação de seu artigo de 1672 fizeram Newton repensar certos pontos de sua teoria e também influenciaram a maneira como a apresentou no *Opticks*. É importante observar que não comentaremos todos os experimentos relativos a cada proposição do Livro I pelo simples motivo que esses são muito numerosos. Muitas vezes os experimentos serão apresentados resumidamente, sem levar em conta toda a narrativa passo a passo de Newton. Por isso,

⁸ *Optical lectures*, p. 19

a leitura desta dissertação deve ser preferivelmente acompanhada por constantes consultas ao *Opticks*.

O esclarecimento do contexto histórico no qual se deu a formulação da teoria óptica de Newton, sobretudo seu aspecto controverso e contestativo por parte de outros filósofos, nos dá uma compreensão mais segura da gênese e do desenvolvimento dessa teoria. Esse esclarecimento evita a concepção errônea de que grandes teorias científicas nascem completas da mente de gênios. Por outro lado, a análise da teoria de Newton é relevante sob o ponto de vista do ensino da Física - um aspecto que será discutido brevemente no Apêndice 4.

O corpo da presente dissertação acompanha a seqüência das proposições do Livro I do *Opticks*. Essa seqüência foi escolhida porque essa foi a obra final e mais madura de Newton sobre o assunto. Por adotar essa seqüência, tornou-se difícil dividir o texto da dissertação em capítulos. Assim sendo, a parte principal da presente dissertação está subdividida em seções correspondentes às proposições, sendo algumas muito mais longas do que outras. Qualquer outra divisão seria artificial e alheia ao plano de Newton.

OPTICKS, LIVRO I, PARTE I

No seu *Opticks*, Newton apresentou inicialmente uma série de definições e de axiomas⁹. Nesse início, a intenção principal de Newton era a de resumir os conhecimentos de óptica geométrica anteriormente aceitos (refração, reflexão, formação de imagem, etc.). Não vamos discutir aqui essa parte inicial e sim começar diretamente com as proposições do Livro I, onde se inicia a apresentação da teoria de Newton.

PROPOSIÇÃO I

Luzes que diferem em Cor também diferem em Graus de Refrangibilidade.

A Proposição I é fundamental para toda a teoria desenvolvida no *Opticks*, pois todas as proposições seguintes estão nela baseadas. Segundo esta proposição, a "luz que difere em cor, também difere em graus de refrangibilidade". Newton apresentou dois experimentos para comprovar sua proposição.

Experimento 1.

No primeiro deles (figura 1.11)¹⁰, observou através de um prisma um pedaço de papel preto dividido em duas partes, uma pintada de vermelho e outra de azul. Quando o papel colorido era iluminado pela luz da janela e observado através do prisma, ele aparecia quebrado; a parte pintada de vermelho parecia separada da azul. Quando o prisma era girado em torno de seu eixo, ao invés de todo o papel parecer subir junto, uma das partes se movia mais que a outra. Quando o prisma era girado para cima, a parte azul parecia subir mais que a vermelha e quando era girado para baixo, a azul parecia descer mais que a vermelha. Newton assim explicou:

(...) em ambos os Casos a Luz que vem da metade azul do Papel através do Prisma para os olhos, em Circunstâncias iguais sofre uma Refração maior que a Luz que vem da metade vermelha, e por consequência é mais refrangível.¹¹

⁹ Esse tipo de estrutura, já presente nos *Elementos* de Euclides, havia sido também usado por Newton nos *Principia*.

¹⁰ As figuras da Parte I são indicadas pelo algarismo 1 seguido pela numeração usada por Newton e as da Parte II pelo algarismo 2, seguindo a mesma ordem do *Opticks*. No caso de figuras extras, a numeração será feita em algarismos romanos minúsculos.

¹¹ *Opticks*, p. 21.

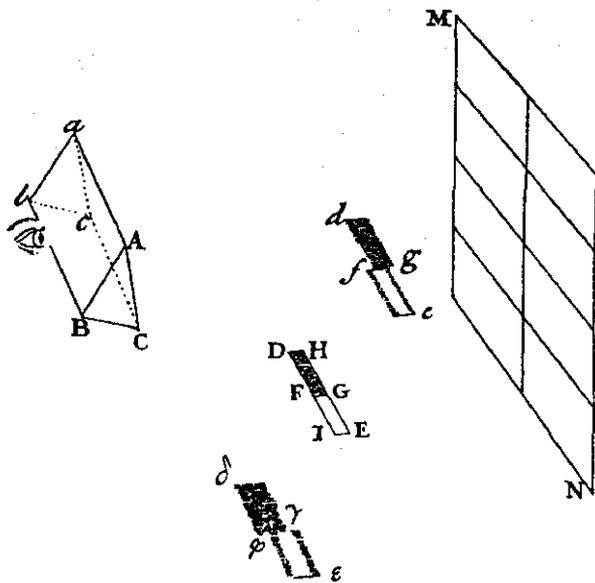


Fig. 1.11

Experimento 2.

No segundo experimento (figura 1.12), Newton testou a refrangibilidade dos raios coloridos observando a imagem do papel de duas cores formada num anteparo branco por uma lente convergente. Para isso, enrolou um pedaço de fio preto delgado no papel pintado de azul e vermelho (essas linhas serviam para que o papel colorido parecesse dividido em muitos pedaços pequenos, permitindo verificar a nitidez da imagem) e iluminou o conjunto com uma vela. Percebeu que não era possível focalizar as duas partes simultaneamente pois quando a distância entre a lente e o papel colorido era adequada para focalizar a parte azul do papel, não o era para focalizar a parte vermelha, sendo necessário afastar o papel da lente para que o vermelho parecesse focalizado. Isto quer dizer que a distância focal da lente dependia da cor utilizada, sendo maior para o vermelho do que para o azul. Se a distância focal muda com a cor significa que cada cor sofre uma refração diferente.

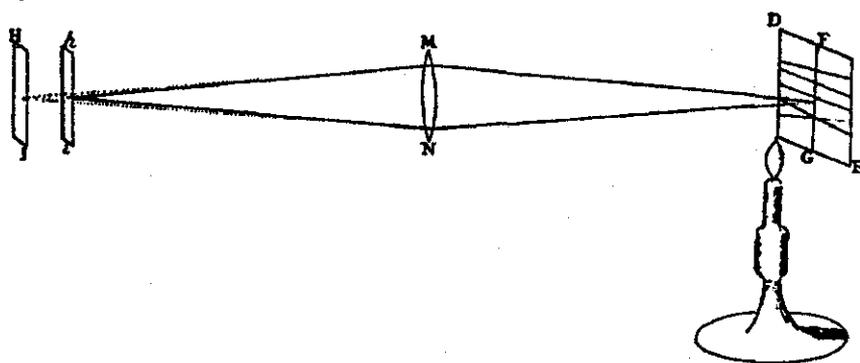


Fig. 1.12

O primeiro experimento havia sido usado por Newton desde seu ensaio *Of Colours*¹² para provar que raios de cores diferentes sofrem refrações diferentes¹³. O

¹² *Notebook*, p. 467.

experimento presente naquele ensaio era basicamente igual ao apresentado no *Opticks*, mas ao invés de observar um papel pintado de duas cores através de um prisma, Newton havia observado uma linha azul emendada com uma outra linha vermelha.

Newton já tinha estabelecido a relação entre cor e refrangibilidade desde a elaboração do *Of Colours* em 1666, no entanto ali ela não apareceu explicitamente. Newton explicou as observações (as linhas coloridas vistas através do prisma aparecem descontínuas na emenda entre as duas) afirmando que "os raios azuis sofrem uma refração maior que os vermelhos". Nas *Optical lectures*, Newton não apresentou esse tipo de experimento com cores refletidas por objetos; a relação entre cor e refrangibilidade é estabelecida através do experimento de decomposição da luz branca do Sol que, como veremos adiante, não é suficiente para provar tal relação.

No *Opticks*, Newton descreveu esse experimento com bastante rigor e alertou o leitor para os cuidados experimentais necessários. O papel usado como fundo devia ser preto para que não houvessem reflexões que pudessem interferir no resultado observado. Também é importante que as cores usadas sejam intensas e cubram uniformemente o papel preto. Além disso, a parede onde está a fonte de luz (a janela) também deve ser coberta com um pano preto para evitar as reflexões.

A homogeneidade da luz é outro elemento a ser levado em conta. A luz vermelha de uma estreita faixa espectral é homogênea (segundo a definição de Newton) pois não pode ser separada em outras cores pela refração; mas a luz refletida por um objeto vermelho não é homogênea pois um objeto vermelho reflete em maior quantidade os raios vermelhos, mas também reflete em menor quantidade os raios azuis, verdes, etc. No ensaio *Of Colours*, Newton não levou em consideração essa questão, mas no *Opticks* comentou que os resultados observados nesse experimento são mais perceptíveis se as cores usadas forem mais intensas, isto é, se os raios vermelhos forem refletidos em maior quantidade que os outros:

Desses experimentos não se segue que toda a Luz do azul é mais refrangível que toda a Luz do Vermelho: pois ambas as Luzes são misturas de Raios diferentemente refrangíveis, e assim no vermelho há alguns Raios não menos refrangíveis que aqueles do azul e no azul há alguns Raios não mais refrangíveis que aqueles do vermelho: Mas esses Raios, em proporção com a totalidade da Luz são poucos, e não são capazes de destruir o Evento do Experimento, mas são capazes de diminuí-lo¹⁴.

Devemos notar que Newton não usou luz solar direta nesses experimentos (usou a luz refletida pelo papel colorido) e por isso eles só são válidos para justificar a afirmativa de que as luzes refletidas por objetos que diferem em cor, diferem em refrangibilidade. Por outro lado, a citação acima mostra que uma discussão mais completa desses experimentos pressupõe uma distinção entre luz homogênea e composta, que só fica clara mais adiante no *Opticks*.

Em nossa opinião, esses experimentos são bastante didáticos pois são simples de serem executados e seus resultados são bastante claros. A interpretação dos resultados porém, apresenta algumas dificuldades. Embora sejam experimentos introdutórios, são conceitualmente complexos, pois os detalhes necessários para a interpretação dos

¹³ Esses experimentos são qualitativos. Os resultados são apenas visuais pois nesse tipo de experimento é impossível fazer medidas de ângulos já que não se trata de experimentos com raios ou feixes de luz.

¹⁴ *Opticks*, pp. 25-26.

resultados - diferença entre cores simples e compostas, imutabilidade das cores simples - dependem de conceitos que serão esclarecidos somente nas proposições seguintes.

Na correspondência de Newton, somente Lucas¹⁵ criticou os resultados e interpretações desse tipo de experimento (inéditos até a publicação do *Opticks*). Ele reconheceu que os experimentos apresentados por Newton em 1672 formam uma cadeia lógica que realmente leva à teoria newtoniana. Lucas se referiu a eles como

(...) essas inferências engenhosas e naturais [de Newton que] foram para mim, em uma primeira olhada, uma forte conjectura a favor de sua nova doutrina; tendo eu observado antigamente cadeias de inferências sobre buscas de verdades naturais. Mas como vários experimentos de refração permanecem ainda intocados por ele, pensei que uma busca a mais deles deveria ser muito própria para novas descobertas da verdade de suas asserções.¹⁶

Lucas criou vários experimentos para testar a teoria newtoniana, mas seus resultados contrariaram a teoria¹⁷; dois deles são semelhantes aos apresentados por Newton no *Opticks* para provar sua Proposição I:

1. Observou através de um microscópio dois pedaços muito pequenos de seda (um vermelho e outro violeta) colocados juntos. De acordo com a teoria de Newton, não deveria ser possível focalizar ambos simultaneamente pois os raios violetas são mais refratados que os vermelhos. Lucas sempre observou os dois pedaços de seda focalizados juntos.

2. O segundo experimento foi feito com vários pedaços de seda coloridos com as cores do espectro presos em uma régua em linha reta e imersos na água. Segundo a teoria newtoniana, os pedaços de seda deveriam aparecer desalinhados quando o conjunto fosse observado obliquamente ou através de um prisma. Lucas notou que eles continuaram em linha reta em ambos os casos.¹⁸

Em 1672, Newton admitiu que os microscópios também apresentavam problemas de focalização:

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*.¹⁹

Logo, parecia sensato por parte de Lucas testar a teoria newtoniana através da observação de objetos coloridos através do microscópio.

¹⁵ Anthony Lucas (1633-1693), jesuíta e professor de Teologia no Colégio de Liège. Enviou três cartas a Newton através de Oldenburg (cartas 161, 185 e 200 da *Correspondence*), onde relatou nove experimentos cujos resultados contrariavam a teoria newtoniana de luz e cores. Newton manteve um tom agressivo e arrogante em suas cartas a Lucas, apesar deste apresentar argumentos experimentais e não hipotéticos contra a teoria de Newton.

¹⁶ LUCAS 1676a.

¹⁷ Sobre a disputa entre Newton e os jesuítas de Liège, entre eles Lucas, veja WESTFALL 1966; GRUNER 1973; e GUERLAC, *Newton on the continent*, pp. 89-98.

¹⁸ LUCAS 1676a.

¹⁹ NEWTON 1672a.

De acordo com Newton²⁰, o fato de Lucas não ter observado nenhuma diferença no foco dos dois pedaços de seda não contrariava sua teoria. Newton apontou três fatores que poderiam explicar os resultados de Lucas: o foco de um microscópio não é um ponto perfeito, "ele é grande o suficiente para conter os focos de todos os tipos de raios (...)"; as cores dos pedaços de seda não são puras, como supôs Lucas; e, por último, Lucas "não considerou como os olhos se alteram e se ajustam para verem distintamente as Imagens dos Objetos a várias distâncias (...)".

As objeções apresentadas por Newton contra os resultados experimentais de Lucas não são muito convincentes: como dito acima, no segundo experimento apresentado para provar a Proposição I do *Opticks*, Newton usou uma lente para focalizar as partes azul e vermelha de um papel. Ele não conseguiu focalizar ambos simultaneamente e explicou isso afirmando que cada cor é focalizada em um ponto diferente pois têm refrangibilidades diferentes. É de se estranhar que ora o foco de uma lente é finito, ora não.

A segunda objeção de Newton se deve ao fato de que quando não se usam cores puras (ou muito intensas), o efeito observado é bem menor. No entanto, essa objeção faz sentido apenas dentro da teoria newtoniana que distingue cores compostas e cores puras pois o critério usado nessa distinção - cada cor pura tem uma refrangibilidade própria - pressupõe que a teoria é verdadeira, contrariando o espírito indutivista da época. Dentro do contexto do século XVII, onde a concepção de teorias indutivistas era predominante entre os membros da *Royal Society*, as proposições deveriam ser, uma a uma, provadas por experimentos sem levar em conta nenhum pressuposto teórico.

A terceira objeção de Newton, discutida por Gruner²¹, é muito estranha. Por que os olhos se ajustam apenas nos experimentos de Lucas? Pode-se argumentar que esse ajuste é subjetivo e depende dos olhos de cada indivíduo, mas deve-se lembrar que os experimentos do *Opticks* mencionados acima são semelhantes a esses de Lucas e não apresentam nenhum problema de ajuste dos olhos do observador.

As objeções de Newton poderiam ser muito mais convincentes se ele tivesse notado que Lucas não usou um fundo negro em seus experimentos - pelo menos não mencionou nada a respeito - o que impediria que a luz refletida pelo ambiente se misturasse à luz refletida pelos pedaços de seda colorida, o que tornaria o efeito observado bem mais difícil de ser observado. Além disso, as dificuldades encontradas por Lucas para obter a mesma dispersão que Newton em seus experimentos pode ser devida ao uso de um tipo de vidro com poder de dispersão menor²². As "provas" experimentais de Lucas contrárias à teoria newtoniana são uma demonstração contundente das dificuldades existentes nos experimentos de dispersão.

PROPOSIÇÃO II

A luz do Sol consiste em Raios com diferentes Refrangibilidades.

²⁰ NEWTON 1677a.

²¹ GRUNER 1973, p. 324.

²² Há controvérsias quanto essa a questão. Kuhn e grande parte dos historiadores da ciência defendem que o tipo de vidro usado por Lucas na fabricação de seus prismas era diferente do usado por Newton (KUHN, em *Papers & Letters*, p. 35, n.13); Westfall (1966, pp. 308-9) afirma que o tipo de vidro usado não é o ponto relevante na disputa, os resultados de Lucas seriam devidos a erros experimentais cometidos por ele em suas medidas.

Esta é a mais importante proposição da teoria de Newton sobre as cores. Para entendê-la, é necessário conhecer um pouco do contexto da época.

Em 1672, Newton havia definido cores como propriedades intrínsecas dos raios de luz:

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 diferentes nos diversos Raios.

No *Opticks*, Newton apresentou oito experimentos usando a luz prismática para provar que a luz do Sol é uma mistura de raios com diferentes refrangibilidades. Esses experimentos consistem basicamente no estudo da refração sofrida por um feixe de luz solar ao atravessar um prisma. No entanto, como veremos a seguir, eles não provam o que se propõe provar; isto é, não provam que a *luz solar* é uma mistura de raios; eles provam apenas que os raios que compõe o espectro formado pela luz *solar após ela passar* pelo prisma são refratados de quantidades diferentes.

O estudo da forma como Newton apresentou essa proposição no *Opticks*, comparada com a forma que a apresentou em seu artigo de 1672 ilustra bem como as críticas recebidas após essa primeira publicação influenciaram a elaboração de sua última obra.

Experimento 3.

Nesse experimento, já apresentado em 1672, Newton fez a luz solar entrar em um quarto escuro através de um pequeno furo na janela e atravessar um prisma posicionado de tal forma que "as refrações da luz nos dois lados do ângulo refrativo, isto é, na entrada dos raios no prisma e na sua saída, eram iguais umas às outras"²³. A figura 1.13 mostra o feixe de luz solar refratado incidindo perpendicularmente na parede oposta do quarto formando uma mancha²⁴ alongada e colorida.

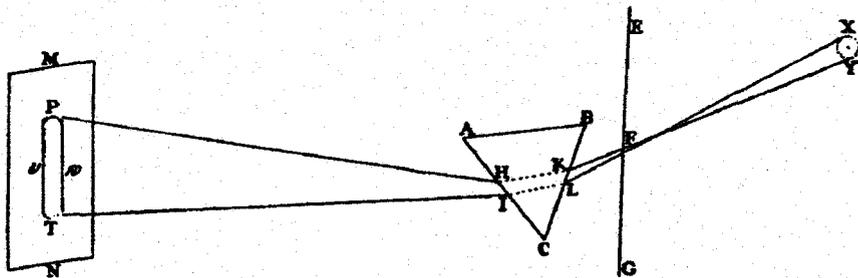


Fig. 1.13

²³ *Opticks*, p. 28.

²⁴ Se considerarmos *imagem* como sendo a região do anteparo onde cada ponto corresponde à um único ponto do objeto, não é correto dizer que o prisma projeta uma *imagem* na parede, embora Newton tenha utilizado esse termo. Um prisma (com superfícies planas) produz uma *imagem virtual* de objetos reais que pode ser vista olhando-se para o objeto através do prisma. Apenas com o uso de uma lente convergente para focalizar os raios é possível produzir uma *imagem real* na parede. O que Newton observava era uma *mancha* luminosa na parede ou anteparo. Apesar dessa ressalva seguiremos usando o termo *imagem*, adotando a terminologia de Newton.

Usando um prisma cujo ângulo vertical de 64° , Newton obteve que a largura da imagem projetada na parede correspondia ao diâmetro aparente do Sol, ou seja, cerca de 31 minutos. No entanto, o comprimento da imagem correspondeu a $10\frac{1}{4}$ polegadas, ou seja, era cerca de cinco vezes maior que a largura. Essa discrepância entre a largura e o comprimento da imagem formada no anteparo é o ponto fundamental desse experimento pois, "de acordo com as leis da óptica vulgarmente aceitas", a imagem deveria ser circular.

Há três problemas nesse experimento que merecem ser discutidos detalhadamente para entendermos por que a imagem formada deveria ser circular: 1. a posição do prisma, 2. a incidência da luz refratada no anteparo e 3. a definição do formato do espectro observado.

Posição de desvio mínimo

De acordo com a lei cartesiana de refração, para o caso de a luz incidente ter um único índice de refração, há uma posição do prisma que produz uma imagem circular. É a chamada "posição de desvio mínimo". Quando o prisma está ajustado nessa posição, pequenas rotações ao redor de seu eixo não produzem mudanças na direção dos raios emergentes e o ângulo de desvio (ângulo formado entre os raios incidentes e emergentes) é mínimo (figura i)²⁵.

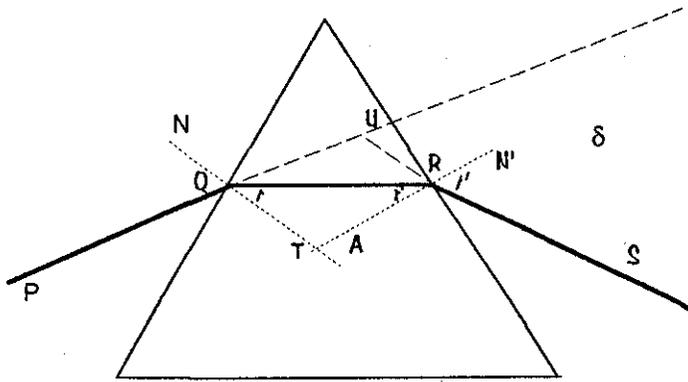


Fig. i

Seja um raio incidente PQ que sofre duas refrações e emerge desviado de um ângulo δ em relação à direção incidente. A lei de Snell aplicada às refrações Q e R fornece as equações

$$\text{sen } i = n \cdot \text{sen } r \quad (1)$$

$$\text{sen } i' = n \cdot \text{sen } r' \quad (2)$$

A análise dos triângulos QTR e QUR fornece as equações 3 e 4:

$$r + r' = A \quad (3)$$

$$\alpha + \beta = \delta \quad (4)$$

²⁵ Essa demonstração está presente em vários livros-texto, como por exemplo ALONSO-FINN, *Física* vol II, pp. 407-8.

com $\alpha + r = i$ e $\beta + r' = i'$, logo

$$\delta = i + i' - A \quad (5)$$

As 3 primeiras equações servem para traçar o caminho do raio e a quarta permite calcular o desvio sofrido pelo raio emergente RS.

Existe um caminho particular para o qual o desvio é mínimo: derivando a equação 5 com relação à i podemos encontrar o ângulo de incidência que proporciona o mínimo desvio:

$$\frac{d\delta}{di} = 1 + \frac{di'}{di} = 0 \quad (6)$$

$$\text{logo } \frac{di'}{di} = -1. \quad (7)$$

Das equações 1, 2 e 3 temos:

$$di \cdot \cos i = n \cdot dr \cdot \cos r,$$

$$di' \cdot \cos i' = n \cdot dr' \cdot \cos r' \text{ e}$$

$$dr = -dr', \text{ logo}$$

$$\frac{di'}{di} = \frac{-\cos r' \cos i}{\cos i' \cos r} \quad (8)$$

Como os ângulos i , i' , r e r' são menores que $\pi/2$ e obedecem as equações 1 e 2, as equações 7 e 8 só podem ser simultaneamente satisfeitas se, e somente se, $i = i'$ e $r = r'$. Nesse caso o caminho do raio é simétrico com respeito às duas faces do prisma.

Das equações 3 e 5 podemos encontrar o valor do ângulo de incidência que proporciona o desvio mínimo:

$$\delta_{\min} = 2i - A \rightarrow i = (\delta_{\min} + A)/2. \quad (9)$$

É possível provar que quando o prisma está ajustado nessa posição a imagem formada por um feixe de luz monocromático é circular²⁶.

Desde o ensaio *Of Colours*, Newton já ajustava o prisma na posição de mínimo desvio. No entanto, a única referência que fazia sobre isso era: "sendo os raios igualmente refratados em sua entrada e saída"²⁷. Portanto, Newton já conhecia a importância da posição simétrica do prisma desde o início de seus trabalhos.

Em seu artigo de 1672 Newton faz um breve comentário sobre a posição adequada do prisma:

²⁶ A demonstração de Newton pode ser encontrada em NEWTON, *Optical lectures*, p. 273.

²⁷ *Notebook*, p. 468.

Também a refração em ambos os lados do prisma, isto é, dos raios incidentes e emergentes eram tão próximos quanto pude fazê-los iguais (...) ²⁸

Como dito acima, a posição do prisma que obedece essa condição é a posição de mínimo desvio. Mas em seu artigo de 1672 Newton não destacou a importância da posição correta do prisma para a análise dos experimentos e nem comentou que apenas nessa posição a imagem formada poderia ser circular.

Embora Newton não tenha discutido detalhadamente a questão da posição de mínimo desvio em seu artigo de 1672, fez essa demonstração no *Optical lectures* ²⁹, onde também propôs e descreveu com bastante precisão uma maneira simples de se encontrar a posição de mínimo desvio. ³⁰

No *Opticks*, Newton foi muito cuidadoso ao descrever a posição na qual o prisma deveria estar ajustado para que o Experimento 3 tivesse o sentido por ele proposto de verificar se todos os raios luminosos sofriam refrações iguais ou não. Ele ensinou o leitor encontrar a posição de mínimo desvio de modo semelhante ao do *Optical lectures*:

Em torno desse eixo [do prisma] girei o Prisma lentamente, e vi na Parede a Luz refratada, ou Imagem colorida do Sol, primeiro descer e depois subir. Quando a Imagem pareceu Estacionária, entre a Subida e a Descida, parei o Prisma e o fixei naquela Postura, para que não se movesse mais. Pois naquela Postura as Refrações da Luz nos dois Lados do Ângulo refrator (...) eram iguais uma à outra. ³¹

Também explicou detalhadamente por quê o formato da imagem deveria ser circular quando o prisma estava ajustado na posição de desvio mínimo (ver figura 1.13):

Como as refrações nos dois lados do prisma são iguais uma à outra, isto é, a refração em K é igual à refração em J, e a refração em L é igual à refração em H, de tal modo que as refrações dos raios incidentes em K e L tomadas juntas, são iguais às refrações dos raios emergentes em H e J tomadas juntas: segue-se que pela adição de coisas iguais com coisas iguais, que as refrações em K e H tomadas juntas são iguais às refrações em J e L tomadas juntas, e portanto os dois raios sendo igualmente refratados, têm a mesma inclinação um em relação ao outro que tinham antes; isto é, a inclinação de meio grau correspondendo ao diâmetro do Sol ³².

Em 1672, Newton disse claramente que *computou* o ângulo entre os raios solares após a passagem da luz pelo prisma ajustado na posição de mínimo desvio, notando

(...) que os raios emergentes deveriam compreender um ângulo de cerca de 31', como faziam antes de incidirem [no prisma]. ³³

²⁸ NEWTON 1672a, p. 49.

²⁹ *Optical lectures*, pp. 53-54. Newton não faz tal demonstração geométrica no *Opticks*. O Apêndice 3 apresenta uma explicação resumida da demonstração de Newton.

³⁰ *Optical lectures*, pp. 61-3.

³¹ *Opticks*, p. 28.

³² *Opticks*, p. 32.

³³ NEWTON 1672a, p. 49.

Newton apenas indicou o tipo de cálculo que efetuou, sem apresentar os detalhes necessários para seu perfeito entendimento. Provavelmente realizou uma série de cálculos bastante maçantes: considerou dois raios luminosos, incidindo sobre a primeira face do prisma, com ângulos um pouco diferentes de $54^{\circ} 4'$, de tal modo a formarem um ângulo de $31'$ entre si (ou seja, um deles seria de $54^{\circ} 19,5'$ e o outro $53^{\circ} 48,5'$). 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 saíram 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. Note-se que Newton apenas se preocupou em discutir o ângulo *vertical* formado pelos raios e não a abertura *horizontal* do feixe. Implicitamente, Newton supôs que o ângulo horizontal não poderia sofrer mudança ao passar pelo prisma. Nas *Optical lectures*, Newton demonstrou que, para raios incidentes próximos ao plano principal do prisma, a abertura angular horizontal do feixe após passar pelo prisma é igual à abertura inicial.³⁴

Newton não indicou no *Opticks* os valores dos ângulos dos raios incidentes e emergentes, mas no artigo de 1672 informou que

E o Ângulo vertical do Prisma [era de] $63^{\circ} 12'$. Também as Refrações em ambos os lados do Prisma, isto é, dos Raios Incidentes e Emergentes, eram tão próximas quanto pude fazê-las e conseqüentemente cerca de $54^{\circ} 4'$ ³⁵. E os Raios incidiam perpendicularmente sobre a parede.³⁶

Como dito, o ângulo observado entre os raios defletidos pelo prisma era $2^{\circ} 49'$ ao invés de $31'$. As leis comuns da refração não eram suficientes para explicar essa alongação da imagem. Um novo elemento proposto por Newton apresentava uma explicação para essa discrepância - os raios coloridos que emergem de um prisma sofrem refrações diferentes: os raios que foram para a parte superior P da imagem sofreram a maior refração e os que foram para a parte inferior T, a menor.

Newton concluiu as discussões sobre esse terceiro experimento, estabelecendo a validade da relação entre cor e refrangibilidade para os raios de luz refratados pelo prisma. Notemos que Newton não diferencia os raios emergentes do prisma e os raios provenientes da luz solar, ignorando, assim, uma eventual transformação dos raios causada pela refração³⁷.

Essa imagem ou espectro³⁸ PT era colorida, sendo vermelha em seu final menos refratado T, e violeta em seu final mais refratado P, e amarelo, verde

³⁴ No caso geral em que os raios incidem no prisma com um ângulo qualquer, o cálculo é extremamente complexo, como mostramos no Apêndice 2. Nesse caso, pode ocorrer mudança na abertura angular horizontal do feixe ao passar pelo prisma.

³⁵ 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 $i = r$, teremos que $2i = \delta + A = 108^{\circ} 8'$.

³⁶ NEWTON 1672a, p. 49.

³⁷ Mais adiante discutiremos essa questão com mais detalhes.

³⁸ O nome "espectro" foi utilizado pela primeira vez por Newton, nesse sentido. Em 1672, ele utilizou as palavras "espectro" e "fantasma" para se referir a essas cores. Provavelmente essas expressões queriam indicar que se tratava de cores "falsas", diferentes das cores dos corpos coloridos - uma distinção que existia desde a Antiguidade.

e azul nos espaços intermediários. O que concorda com a primeira proposição, que luz que difere em cor também difere em refrangibilidade.³⁹

Na realidade a Proposição 1 concorda com esse experimento, como Newton afirmou, apenas se a distinção aristotélica entre cores verdadeiras e cores falsas for descartada⁴⁰. Se as cores produzidas pelo prisma tivessem uma natureza diferente da luz emitida por um corpo colorido, não seria possível identificar as duas situações.

O significado do Experimento 3 para Newton aparece explicitamente na discussão que faz sobre o Experimento 5:

(...) deve-se considerar que os raios que são igualmente refrangíveis caem sobre um círculo correspondendo ao disco do Sol. Pois isso foi provado no terceiro experimento. (...) AG [na figura 1.15] representa o círculo que todos os raios mais refrangíveis propagados de todo o disco solar poderiam iluminar e pintar sobre a parede oposta se eles estivessem sozinhos; EL o círculo que todos os raios menos refrangíveis poderiam da mesma maneira iluminar e pintar se estivesse sozinhos; BH, CJ, DK, os círculos que muitos tipos intermediários de raios poderiam pintar sucessivamente a parede, se eles fossem unicamente propagados do Sol em ordem sucessiva, o resto sendo sempre interceptado.⁴¹

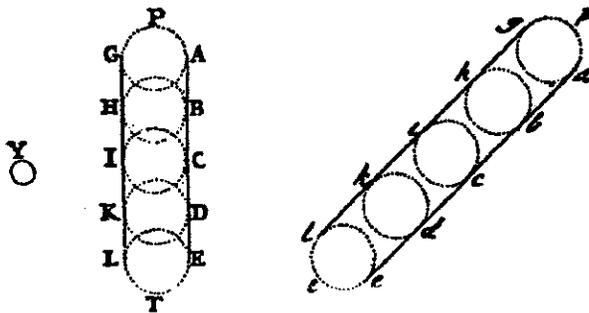


Fig. 1.15

Newton pressupõe que os vários tipos de raios coloridos estão presentes na luz solar antes desta ser refratada pelo prisma e atribui ao prisma o papel de apenas separar esses diferentes tipos de raios.

³⁹ *Opticks*, p. 33.

⁴⁰ Antes de Newton, as cores produzidas pelo prisma eram consideradas "falsas" e diferentes das cores naturais. Os comentadores aristotélicos medievais introduziram a distinção entre cores aparentes ou "falsas", que são cores passageiras, como as do arco-íris e prismas e as cores "verdadeiras" que são as qualidades intrínsecas dos corpos coloridos. Nessa visão escolástica, as cores aparentes são modificações da luz incidente, enquanto que as cores reais são qualidades inerentes dos corpos e distintas da luz incidente, que é apenas o veículo que transporta as cores até os olhos (*Optical lectures*, pp. 3-4). Os filósofos mecanicistas do século XVII se rebelaram contra essa distinção. Embora eles fossem divididos em diversos grupos, concordavam em aceitar que todos os corpos naturais consistem apenas em partículas de vários tamanhos, formas e movimentos e que todo conhecimento dos corpos deriva da sensação que é simplesmente movimento propagado através dos nervos para o cérebro. Para Boyle, por exemplo, toda luz é percebida como colorida, isto é, "a própria Luz produz a sensação de uma Cor (...) que produz um determinado tipo de movimento local em alguma parte do cérebro" (BOYLE, *Experiments touching colours*, p. 84)

⁴¹ *Opticks*, p. 38.

Ao analisar o experimento com um prisma, o padre Pardies⁴² não se espantou diante do fato da imagem formada não ser redonda. Em sua primeira carta criticando o trabalho de Newton de 1672, Pardies utilizou um argumento bem mais simples do que o de Newton no *Optical lectures* para analisar a deflexão da luz por um prisma e mostrar que o formato alongado da imagem não era surpreendente como pensou Newton⁴³.

Notamos que o argumento de Pardies se baseia no estudo das projeções dos raios provenientes do disco solar no plano paralelo à base do prisma e no plano perpendicular. Embora esse argumento não seja correto, ele é uma boa aproximação para quando os raios atingem o prisma próximos ao seu plano principal, isto é, próximos ao plano perpendicular ao eixo do prisma⁴⁴.

Para ele, de acordo com as leis da óptica comumente aceitas, a imagem formada após a passagem da luz pelo prisma deveria ser alongada. Os raios provenientes das laterais do Sol são igualmente refratados pela primeira face do prisma e sofrem uma refração contrária ao passarem pela segunda face, assim a imagem formada não muda de largura. Já os raios que vem da parte de cima e de baixo do Sol incidem no prisma com diferentes ângulos e conseqüentemente sofrem refrações diferentes em ambas as faces do prisma, resultando numa imagem alongada⁴⁵.

A projeção dos raios num plano paralelo à base do prisma sugere que o ângulo formado pelos raios projetados nesse plano não muda após a passagem da luz através do prisma pois os raios incidentes e emergentes são paralelos (figura ii.a). No entanto, no caso da projeção dos raios no plano perpendicular ao eixo do prisma não ocorre o mesmo. Os raios que vêm de partes opostas do disco solar atingem o prisma com inclinações diferentes, formando um ângulo de cerca de meio grau⁴⁶. O ângulo formado entre os raios incidentes em geral é diferente do formado pelos emergentes (figura ii.b) pois os raios sofrem diferentes deflexões devido a diferença de meio grau em suas incidências.

⁴² Ignace Gaston Pardies (1636-1673), jesuíta francês e professor de retórica do colégio Louis-le-grand em Paris. Sua primeira publicação científica foi *Horologium thaumaticum duplex* (Paris, 1662). Seus *Discours du mouvement local* (Paris, 1670) e *Elements de géométrie* (Paris, 1671) foram traduzidos para o inglês. Ao morrer deixou um manuscrito sobre óptica no qual expôs sua teoria ondulatória de propagação da luz. Huygens viu o manuscrito de Pardies antes de escrever seu *Tratada da luz*. Pierre Ango editou esse manuscrito em sua *L'Optique divisé en trois livres* (Paris, 1682).

⁴³ PARDIES 1672a, pp. 86-9.

⁴⁴ Quando um feixe de luz atinge um prisma ocorre um processo de deflexão complexo que se dá no espaço e não no plano. Fizemos uma discussão geométrica sobre essa deflexão que está no Apêndice 2.

⁴⁵ PARDIES 1672a, pp. 87-8.

⁴⁶ Newton usou em seu trabalho o diâmetro aparente do Sol como sendo 31'.

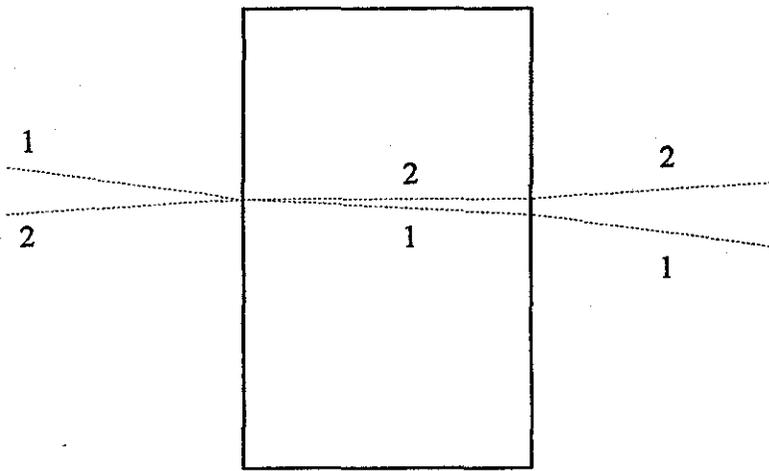


Fig. ii.a

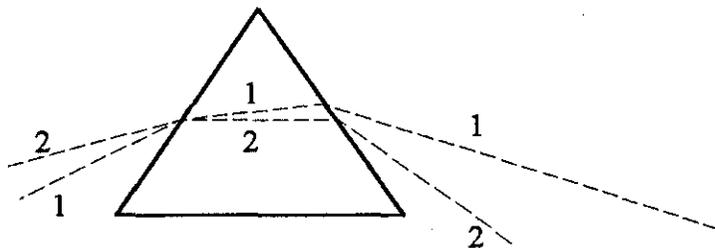


Fig. ii.b

Isso significa que na projeção horizontal os raios mantêm o ângulo de cerca de meio grau mas na projeção perpendicular o ângulo formado pelos raios emergentes é maior. Sendo assim, a imagem formada será oblonga.

É notável que a explicação apresentada por Pardies para a formação de uma imagem oblonga leva em conta apenas "as leis da refração aceitas" por todos, não havendo a necessidade da introdução de nenhuma hipótese nova sobre a constituição da luz. Esse argumento é similar (mas não equivalente) à análise exata do problema para o caso em que os raios atingem o prisma próximos ao plano principal.

Para demonstrar a validade das leis comuns da dióptrica, Pardies calculou o efeito do Sol não ser uma fonte puntual e apresentar um diâmetro aparente de 30'. Em seus cálculos supôs que os raios incidentes sofrem a mesma refração ao longo de toda superfície do prisma e que o ângulo de refração do prisma é de 60°. Os dois raios provenientes dos extremos da superfície do Sol incidem com ângulos de 30° e 29° 30' em relação à normal à superfície. Obteve que os raios saíam do prisma formando um ângulo de 2° 23'. Refazendo-se os cálculos utilizando as mesmas hipóteses que Pardies e um índice de refração do vidro igual a 1,5, encontra-se uma abertura de 1° 40', logo Pardies apresentou um resultado bastante exagerado para a alongação⁴⁷. É notável que o erros de Pardies tenham passado despercebidos por Newton que conhecia os cálculos corretos⁴⁸.

Newton respondeu dizendo que Pardies não entendeu o experimento e por isso afirmou que as leis aceitas da refração dão conta de explicar o fenômeno:

⁴⁷ Como Pardies não apresentou explicitamente os cálculos em sua primeira carta não podemos saber onde ele errou.

⁴⁸ Newton estudou as projeções de raios no *Optical lectures* pp. 54-57.

Mas o Padre Pardies está num erro. Ele fez a refração das diferentes partes do prisma tão diferentes quanto possível, enquanto que no experimento, e nos cálculos, eu empreguei refrações iguais.⁴⁹

Ou seja: aqui Newton chamou a atenção para a posição de mínimo desvio do prisma, que não havia sido enfatizada no artigo e não havia sido levada em conta por Pardies.

Sobre essa questão, Pardies respondeu em sua segunda carta que realmente tinha assumido que os raios sofriam refrações diferentes ao passarem pelas duas faces do prisma e concordou que na posição particular de mínimo desvio dos raios, a imagem formada deveria ser circular e não alongada⁵⁰.

A posição de mínimo desvio não era conhecida por todos, já que Newton não havia publicado o *Optical lectures*. Como Sabra apontou⁵¹, Newton simplesmente assumiu que todos já sabiam que quando os raios incidentes e emergentes são simétricos em relação às suas faces a imagem formada é circular e não alongada. Em seu *Optical lectures* e no *Opticks*, Newton disse que o prisma estava colocado numa posição na qual os raios sofriam a mesma refração em ambos os lados do prisma e fez a demonstração geométrica dessa colocação.

A maneira como Newton descreveu o Experimento 3 no *Opticks* é tão detalhada que dificilmente seria mal entendido pelos leitores e geraria críticas como as de Pardies, que refletiram a falta de clareza da apresentação do experimento semelhante no artigo de 1672.

Incidência do feixe perpendicularmente à parede

Como dito anteriormente, além da condição relativa à posição do prisma (posição de mínimo desvio) há outra condição necessária para a realização desse terceiro experimento: a luz após atravessar o prisma deve atingir a parede da sala escura perpendicularmente, pois a incidência não normal resulta na formação de uma imagem alongada independentemente da luz ser monocromática ou não.

Em todos os esquemas feitos por Newton para representar esse experimento a luz após atravessar o prisma atinge a parede perpendicularmente. Além disso, nas figuras, o Sol passa exatamente por um plano vertical perpendicular à parede e que contém o furo da janela. Apenas quando as duas condições são satisfeitas deve-se esperar a formação de uma imagem redonda (de acordo com as leis de refração usuais).

Conforme a narrativa de Newton de 1672, nesse experimento a deflexão do feixe de luz solar é de $44^{\circ} 56'$. Isto significa que quando o feixe refratado incide perpendicularmente na parede, sua direção antes da refração forma com a perpendicular um ângulo de $44^{\circ} 56'$, como mostrado na figura (Figura iii). Há, no entanto, um problema na realização do experimento com os mesmos ângulos usados por Newton, mesmo para alguém que esteja em Cambridge.

⁴⁹ NEWTON 1672b, p. 90.

⁵⁰ PARDIES 1672b, p. 104.

⁵¹ SABRA, *Theories of light*, p. 237.

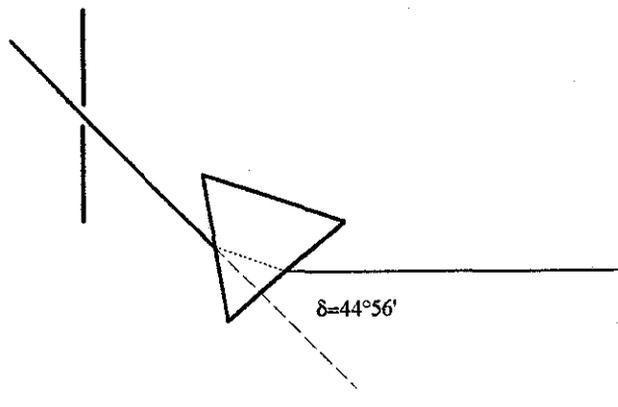


Fig. iii

No começo do ano de 1666 no calendário juliano 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, em qualquer época do ano, 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 poderia mudar a orientação do espelho compensando a variação da posição do Sol. Mas não existe nenhuma evidência de que Newton tenha usado um auxiliar ou um sistema mecânico para manter a direção adequada do feixe incidente.

Newton apresentou uma outra sugestão para resolver o problema da incidência normal do feixe defletido. Numa versão mais antiga do experimento⁵² e no *Opticks* ele sugeriu que a imagem poderia 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 do Experimento 3, elas existem e foram enfrentadas por várias pessoas que tentaram reproduzi-lo posteriormente.

A precisão das medidas de Newton

Vemos que a narrativa de Newton não coincide com as condições experimentais descritas em 1672. Por isso levantamos a hipótese de Newton ter feito esse experimento no começo de 1666, conforme narrou, mas ao apresentar seus resultados em 1672, talvez tenha calculado os valores do ângulo de deflexão ($44^{\circ}56'$) e do comprimento angular da imagem ($2^{\circ}49'$) a partir do índice de refração do vidro e do ângulo vertical do prisma.

⁵² *Optical Lectures*, p. 53.

O instrumento usado por Newton em suas medidas era, segundo Lohne⁵³, o mostrado na figura iv. A precisão das medidas apresentadas por Newton de 1' de arco é muito grande para esse instrumento. Podemos fazer uma estimativa da precisão do instrumento supondo que o ele tenha 20cm de raio e que seja possível ter uma precisão de 1mm na medida da posição da linha NP sobre o arco PQ, sendo assim, a precisão das medidas angulares é de 15' de arco. Além disso, as dificuldades experimentais enfrentadas por Newton são imensas⁵⁴. Para realizar as medidas, Newton deveria esperar o Sol passar exatamente pelo plano vertical que contém o furo, medir o desvio do raio emergente, medir os ângulos de refração e medir também a largura e o comprimento da imagem. Isso tudo com o Sol movendo-se cerca de 15' por minuto, ou seja, a velocidade do espectro sobre a parede era cerca de 2,5cm por minuto.

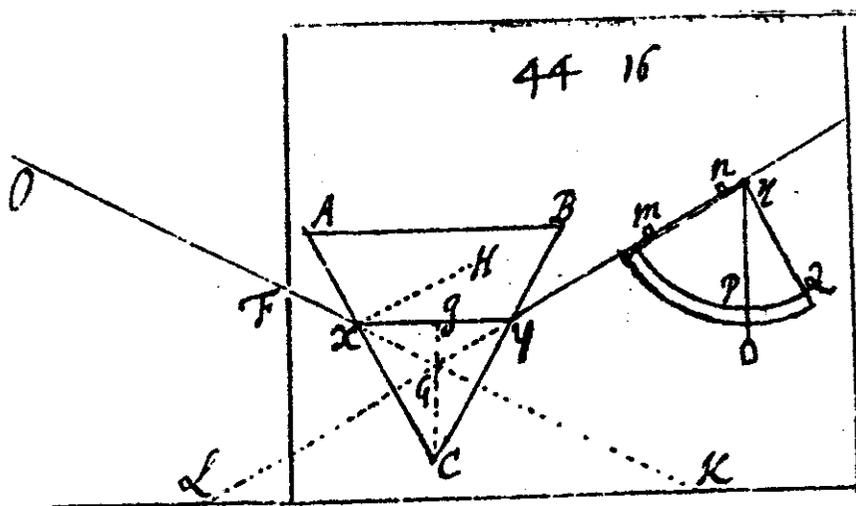


Fig. iv

Um outro indício a favor de nossa hipótese é o fato de Newton não ter realizado medidas angulares em seus experimentos descritos no *Notebook* feitos entre 1664 e 1665. Suas anotações informam claramente que ele mediu o tamanho do espectro sobre a parede usando réguas e indicando valores com precisão de 1/8 de polegada que, como todos sabem, é compatível com esse tipo de medida⁵⁵. Newton também não especificou o ângulo de desvio no experimento descrito no *Notebook*. Referiu-se à posição do prisma como a posição na qual os raios são “igualmente refratados”.

Os únicos valores angulares apresentados são dos ângulos das refrações sofridas pelo raio incidente que podem facilmente ser calculadas pela lei de Snell a partir do ângulo de incidência. O valor do ângulo de incidência apresentado por Newton foi de 30°, o que está de acordo com a possibilidade de precisão obtida por seus instrumentos.

No *Opticks*, Newton também não apresentou valores angulares para seus resultados, isto é, também realizou as medidas usando réguas. O único valor angular que apresentou ao descrever o Experimento 3 é o ângulo vertical do prisma (62,5°) com uma precisão aceitável da ordem de grau e não de minuto como fez em 1672.

⁵³ LOHNE 1964.

⁵⁴ Veja LOHNE 1964, p. 129. Lohne não se refere diretamente a esse experimento e embora reconheça as enormes dificuldades experimentais enfrentadas, defende a idéia de que Newton fez os experimentos.

⁵⁵ *Notebook*, pp. 468-69.

Forma do espectro luminoso

Newton observou que o espectro era "terminado com dois Lados Retilíneos e Paralelos, e dois Finais Semicirculares. [A imagem] era bem distintamente limitada em seus Lados, mas em seus Finais era muito confusa e indistintamente limitada (...) "⁵⁶.

De acordo com o diagrama do *Opticks*⁵⁷ (figura 1.15), o espectro solar é formado por círculos coloridos sobrepostos, cujos centros estão distribuídos ao longo de uma linha reta perpendicular ao eixo do prisma. Uma extremidade é formada por uma imagem circular da cor violeta, a outra formada por uma imagem vermelha e a região intermediária composta de um grande número de círculos coloridos distribuídos ao longo do eixo do espectro. A teoria, portanto, leva à forma descrita por Newton. Mas terá ele realmente visto essa forma?

Sobre essa questão Thomas Kuhn comentou que

A forma relatada é um enigma ilustrativo na natureza do gênio de Newton. Embora o espectro descrito grite pela interpretação que Newton forneceu, é muito duvidoso que ele viu tal forma. Apenas a porção central de 2 polegadas do seu espectro de 2 polegadas e 5/8 de largura era iluminada uniformemente pela luz do disco solar. O balanço da largura do espectro consiste numa região de penumbra na qual as várias cores gradualmente tendem ao preto. Como o olho pode distinguir vermelho muito fraco na região penumbral que distingue azul, Newton provavelmente viu uma figura apreciavelmente mais fina e mais pontiaguda no azul que no vermelho. Essa é a forma que o crítico mais amargo e menos inteligente de Newton, Franciscus Linus⁵⁸, descreveu, e essa é a única crítica de Linus que Newton nunca respondeu⁵⁹.

Em sua carta para Newton de 25 de fevereiro de 1675, Linus disse que as extremidades semicirculares que Newton observou em seus experimentos "não são nunca vistas em um dia claro, como mostra a experiência". Linus disse ter observado "que uma extremidade transformou-se em um fino Cone ou Pirâmide como a chama de uma Vela, e o outro num Cone algo mais obtuso; ambos estão longe de parecerem Semicirculares"⁶⁰.

É muito improvável que Newton tenha realmente observado a forma que descreveu, pois o espectro consiste em uma região central iluminada e uma região de penumbra na qual as cores diminuem até alcançarem o preto. Os olhos distinguem o

⁵⁶ *Opticks*, pp. 28-9.

⁵⁷ *Opticks*, p. 39

⁵⁸ Francis Line (1595-1675), escritor e jesuíta inglês conhecido também como Linus, nasceu em Londres e morreu em Liège. Foi durante 20 anos professor de hebreu e de matemática do colégio de sua ordem em Liège, e de 1656 a 1672 residiu em sua pátria. Suas principais obras que valeram réplicas de Newton, Boyle, Gilbert e Clerke, são as seguintes: *De Pseudo-quadratura circuli D. Thomae Viti* (Londres, 1660), *De corporum inseparabilitate* (Londres, 1661), *De experimento argenti vivi* (Londres, 1662), *Explicatio pyramidis Norogialis erectae in horto Regis Angliae Londini* (Liège, 1673). Além disso deixou três cartas sobre a teoria das cores de Newton e o arco íris (1674, 1675 e 1676). Linus dedicou grande parte de sua vida tentando reconciliar os resultados da experimentação do século XVII com a física aristotélica (*Papers and letters*, p. 34, nota 13). Para mais detalhes sobre a vida e obra de Linus veja REILLY 1992.

⁵⁹ *Papers and letters*, p. 34.

⁶⁰ LINUS 1975b, p. 151.

vermelho mais facilmente que o azul e violeta da região de penumbra, além disso o olho é mais sensível para a região amarela do espectro, como mostra a figura v⁶¹. Por isso Newton provavelmente viu uma figura com forma de gota, com a parte mais fina tingida de azul e violeta e a parte mais larga de amarelo que é a cor mais intensa do espectro solar⁶².

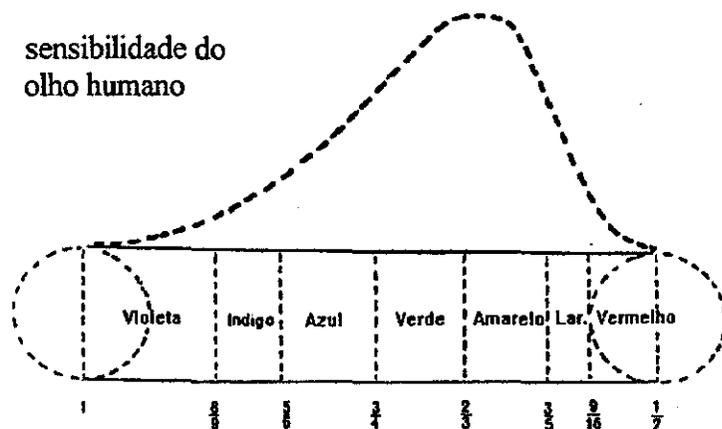


Fig. v

É impossível saber com precisão a forma do espectro observado por Newton pois a sensibilidade do olho para comprimentos de onda próximos ao azul varia de pessoa para pessoa e a intensidade relativa do azul no espectro depende das condições atmosféricas.

Se o experimento fosse feito em uma sala muito escura, talvez o formato visto fosse igual ao descrito por Newton. Nessas condições, embora a intensidade da cor seja bem fraca na região de penumbra, talvez houvesse contraste suficiente entre o fundo negro e o espectro colorido, e a forma descrita por Newton poderia ser visível. Newton reconheceu em 1672 que "(...)o decaimento era tão gradual que era difícil determinar justamente, qual era sua figura, embora parecessem semicirculares".

Segundo Kuhn, a idealização do espectro feita por Newton sugere que ele pensou na intensidade das cores do espectro emitidas pelo sol e percebidas pelo olho como sendo constante até próximo às extremidades do espectro, onde ela diminuiria até chegar à escuridão. A forma descrita por Newton deve ser considerada mais como uma construção teórica do que como resultado de observação pura. No entanto, em suas discussões com Huygens sobre as aberrações esférica e cromática nas lentes usadas em telescópios, Newton afirmou que as cores do espectro não possuem a mesma intensidade⁶³.

A idealização da forma do espectro feita por Newton teve um papel importante para o estabelecimento da sua teoria pois o salto da complexidade de seus resultados experimentais para essa idealização geométrica torna claro que Newton não se restringia apenas às observações experimentais e fazia extrapolações matemáticas dos resultados experimentais baseado em hipóteses⁶⁴.

Após a discussão de alguns problemas da situação experimental utilizada por

⁶¹ Figura do artigo LOHNE 1968, p. 172.

⁶² No artigo LOHNE 1968, pp. 171-3 há uma discussão semelhante sobre essa questão.

⁶³ Veja a discussão sobre a Proposição VII da Parte I onde Newton não considera as intensidades das cores constantes

⁶⁴ *Papers and letters*, p. 35.

Newton em seu Experimento 3 - a importância da posição adequada do prisma e da incidência normal dos raios refratados no anteparo - vê-se que o resultado obtido (forma oblonga da imagem) não está de acordo com as leis aceitas da refração. Esse experimento só permite concluir que há uma diferença na refração sofrida pelos raios após serem refratados pela primeira face BC do prisma da figura 1.13, sendo que os raios que constituem a extremidade azul e violeta são mais refrangíveis que os que constituem a extremidade vermelha. Esse experimento não prova a Proposição II; para mostrar que "a Luz consiste em Raios diferentemente refrangíveis" outros experimentos são necessários.

Experimento 4.

Esse experimento é bastante semelhante ao Experimento 3. Ao invés de estudar a imagem do Sol projetada na parede da sala, Newton olhou para o furo da janela através do prisma ajustado na posição de mínimo desvio. Na descrição desse experimento, Newton também deixou bem claro que o prisma deveria estar ajustado na posição de mínimo desvio:

Então olhei para o furo através do Prisma e girando-o para um lado e para o outro ao redor de seu Eixo para fazer a Imagem do Furo subir e descer, parei o Prisma quando entre esses dois Movimentos contrários ele pareceu Estacionário e as Refrações em ambos os lados do Ângulo refrativo deveriam ser iguais entre si, como no Experimento anterior.⁶⁵

De acordo com o discutido anteriormente, a imagem esperada deveria ser circular, mas era alongada, com o comprimento muitas vezes maior que a largura e

(...) sua parte mais refratada [da imagem] apareceu violeta, a menos refratada vermelha, as partes do meio azul, verde e amarelo, ordenadamente. A mesma coisa aconteceu quando removi o Prisma para fora da Luz Solar e olhei através dele para o buraco brilhando pela Luz das Nuvens através dele⁶⁶.

Provavelmente, na nossa opinião, a observação sobre a luz refletida pelas nuvens é resultado das cartas enviadas por Linus. Para ele, num dia claro sem nuvens "os raios do Sol passando através do dito buraco nunca fazem um *Spectrum* mais longo que largo porque eles ocupam uma pequena parte do Prisma"⁶⁷.

Para Linus o fenômeno da alongação poderia ser explicado pelas leis comuns da refração sem a necessidade de se introduzir o conceito de diferentes refrangibilidades dos raios "pois a nuvem ou nuvens, tão iluminadas, eram em disposição para aqueles raios como um grande Sol, fazendo um maior Ângulo de Intersecção no dito buraco, do que os verdadeiros raios de Sol o fazem; e portanto são capazes de iluminar todo o comprimento do Prisma e não apenas uma pequena parte do prisma"⁶⁸. Também "se o buraco for tão grande que ilumine todo o prisma, você presentemente verá o

⁶⁵ *Opticks*, p. 33.

⁶⁶ *Opticks*, p. 33.

⁶⁷ LINUS 1675a, p. 149.

⁶⁸ *ibid.*

comprimento do *Spectrum* muito exceder sua largura⁶⁹.

Newton explicou detalhadamente para Linus como encontrar a posição de mínimo desvio dos raios, enfatizando que o prisma deveria estar colocado próximo do buraco da janela, "nessa posição do prisma ele [Linus] observará a figura das cores e encontrará que ela não é redonda como ele sustenta, mas oblonga e tão mais oblonga quanto maior o ângulo do prisma (...) e o comprimento da figura não sendo paralelo mas transversal ao eixo do prisma". Suspeitou que Linus não realizou o experimento, apresentando suas críticas baseadas em "noções antigas formadas antes de ele ter alguma indicação para observar a figura da imagem colorida".

A discussão com Linus serve para mostrar que a nova teoria de Newton encontrou um ambiente onde várias outras teorias conviviam confusamente.

Na nossa opinião, esse experimento foi proposto para eliminar argumentos relativos ao tamanho finito do Sol, como os de Linus e Pardies. Como visto⁷⁰, Pardies argumentou que a forma do espectro poderia ser devida ao tamanho do disco solar que faria com que os raios incidissem com ângulos diferentes no prisma e sofressem refrações diferentes.

Após apresentar os experimentos com um único prisma (Experimentos 3 e 4), Newton ressalta que apesar do experimento mostrar que a luz consiste de raios que sob incidências diferentes sofrem refrações diferentes, outras hipóteses ainda podem surgir:

Mas de onde essa diferença surge, se alguns dos Raios incidentes são refratados mais e outros menos constantemente ou por mudança, ou que um e o mesmo Raio é perturbado, quebrado, dilatado, separado e alargado em muitos raios divergentes pela Refração; como supõe Grimaldi⁷¹, ainda não aparece por esse Experimento, mas aparecerá pelos seguintes.⁷²

Portanto o próprio Newton reconheceu que esse experimento não era suficiente para provar que a luz solar é "uma mistura heterogênea de raios". Para mostrar sua proposição, apresentou uma série de outros experimentos (Experimentos 5 até 10) nos quais a luz foi estudada de várias maneiras diferentes.

Experimento 5

Newton testou as hipóteses já existentes, tanto no artigo de 1672 quanto no *Opticks* antes de estabelecer uma nova hipótese, para explicar a diferença do tamanho da imagem previsto (redondo) e o observado (alongado). Em 1672 verificou

(...) o que poderia acontecer pela transmissão da luz através de partes do vidro de diversas espessuras, ou através de buracos na janela de diversos tamanhos, ou (...) a luz ser refratada antes de ser limitada pelo buraco: mas não encontrei nenhuma dessas circunstâncias importantes. A aparência das

⁶⁹ *ibid*

⁷⁰ Ver a discussão sobre o Experimento 3.

⁷¹ Grimaldi havia descoberto o fenômeno de difração da luz, e para explicá-lo havia proposto que os raios da luz, após passarem por uma fenda estreita ou por um fio fino, descreveriam trajetórias curvas. Para mais informações 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.

⁷² *Opticks*, p. 34.

cores era em todos esses casos a mesma.⁷³

Depois de realizar o experimento sob essas diversas circunstâncias sem obter resultados importantes, Newton tentou um segundo experimento:

Então suspeitei se, por alguma irregularidade no vidro ou outra irregularidade contingente, essas cores poderiam ser dilatadas. E para tentar isso tomei outro prisma igual ao primeiro e coloquei-o de tal modo que a luz passando através de ambos poderia ser refratada contrariamente, e pela última [refração] voltar naquele curso, do qual a primeira a tirou. Pois, dessa maneira pensei que efeitos regulares do primeiro prisma poderiam ser destruídos pelo segundo prisma, mas os irregulares mais aumentados pela multiplicidade de refrações. O fato foi que a luz que pelo primeiro prisma foi difusa em uma forma oblonga, foi pelo segundo reduzido numa forma orbicular (...).⁷⁴

Assim sendo a alongação da imagem não pode ser atribuída a nenhuma irregularidade do prisma. Além do mais, se o efeito fosse devido a alguma irregularidade no vidro dificilmente o resultado seria uma imagem oblonga: a passagem pelo vidro provocaria uma difusão do feixe para todos os lados e a mancha continuaria circular, porém menos distinta em suas bordas.

No *Opticks*⁷⁵, Newton apresentou uma discussão mais detalhada sobre a possibilidade de alguma irregularidade ser responsável pela alongação da imagem.

No Experimento 5 mostrado na figura 1.14, Newton testou se a forma oblonga da imagem é causada por "Dilatação de cada Raio ou outra desigualdade casual nas Refrações"⁷⁶. Para isso fez uma modificação no experimento com um prisma:

(...) coloquei um segundo Prisma imediatamente após o primeiro numa Posição transversal a ele, para que pudesse refratar novamente o feixe de Luz Solar que veio do primeiro Prisma. No primeiro Prisma esse feixe foi refratado para cima e no segundo para o lado. E encontrei que pela Refração no segundo Prisma a largura da Imagem não aumentou, mas sua parte superior, que no primeiro Prisma sofreu a maior Refração e apareceu violeta e azul, sofreu novamente no segundo Prisma Refração maior que a parte inferior que apareceu vermelha e amarela, e isto sem qualquer Dilatação da Imagem em largura.⁷⁷

⁷³ NEWTON 1672a, p. 48.

⁷⁴ NEWTON 1672a, p. 48

⁷⁵ *Opticks*, pp. 34-63.

⁷⁶ Esse experimento está apresentado no *Optical lectures* nas pp. 89-91.

⁷⁷ *Opticks*, pp. 34-5.

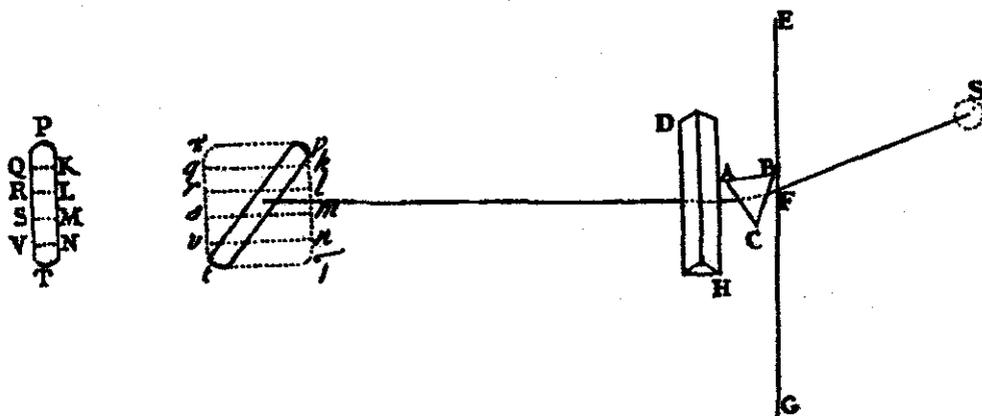


Fig. 1.14

Newton realizou algumas variações desse experimento acrescentado mais um ou dois prismas. Em nenhuma das tentativas observou qualquer dilatação na largura da imagem⁷⁸. Se alguma dilatação dos raios fosse responsável pela alongação da imagem a segunda refração transversal deveria dilatar novamente a imagem resultando numa mancha quadrada.

No *Opticks*, Newton mencionou brevemente a possibilidade de os raios deixarem de se mover em linha reta após atravessarem o prisma como causa da deformação da imagem:

Além disso deve-se observar que os raios foram em linha reta do prisma até a imagem, e portanto em suas saídas do prisma todos tinham aquela inclinação um em relação ao outro na qual o comprimento da imagem era cerca de dois graus e meio.⁷⁹

Em seu artigo de 1672 Newton também levantou essa hipótese mais explicitamente:

Então comecei a suspeitar se os Raios após sua passagem através do Prisma não se moveriam em linhas curvas e, de acordo com sua curvatura maior ou menor tenderiam a diversas partes da parede. 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 para o outro. Mas apesar dessa suspeita plausível, quando a examinei não pude observar tal curvatura neles (...). Observei que a diferença entre o comprimento da imagem e o diâmetro do buraco através do qual a

⁷⁸ Sobre esse experimento veja a discussão de MAMIANI, *Isaac Newton filosofo della natura*, p. 115.

⁷⁹ *Opticks*, p. 31.

luz foi transmitida era proporcional à distância entre eles.⁸⁰

Se a luz caminha em linha reta e o tamanho do buraco na janela é desprezível, as dimensões da imagem formada na parede serão proporcionais à distância entre o buraco e a parede usada como anteparo. Quando as dimensões do buraco são levadas em consideração a diferença entre as dimensões da mancha e do buraco deve ser proporcional à distância entre o buraco e a parede. Como Newton observou essa proporcionalidade, descartou a possibilidade de a luz deixar de caminhar em linha reta.

Essa 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 composto 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 o 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.⁸¹

Esses testes feitos por Newton indicam que ele pensou inicialmente que a luz branca poderia ser modificada pelo meio, produzindo as cores. De fato, quando a luz branca passa por um prisma ou através de um corpo translúcido ela adquire cores. O surgimento dessas cores pode fazer pensar que não houve uma separação ou filtragem das cores, mas sim que elas foram produzidas pelo meio.⁸²

Experimento 6.

Nesse experimento, Newton também estudou o efeito de dois prismas agindo sobre um feixe de luz (figura 1.18). Fez um feixe solar atravessar um prisma ABC e produzir um espectro colorido sobre um anteparo DE com um pequeno furo que permitia que apenas uma pequena parte do espectro passasse através dele. Esse feixe de luz colorida atravessou um segundo prisma *abc* e, após ser refratado por ele, atingiu um outro anteparo MN. Newton pode estudar como cada parte do espectro era refratado. Ao girar lentamente o prisma ABC em torno de seu eixo, viu que o espectro formado no primeiro anteparo subia e descia fazendo com que todas as suas partes passassem sucessivamente pelo furo G e fossem refratadas pelo prisma *abc*. Newton observou que cada parte do espectro refratada pelo prisma *abc* atingia o anteparo em pontos diferentes e

(...) a luz que era mais refratada no primeiro prisma indo para o final azul da imagem, foi novamente mais refratada no segundo Prisma que a luz vinda do final vermelho da imagem, o que prova tão bem a primeira proposição como

⁸⁰ NEWTON 1672a, p. 50.

⁸¹ Aqui Newton está se referendo claramente a Descartes. Para maiores detalhes sobre a teoria de Descartes sobre luz e cores veja SABRA, *Theories of light*, cap. 2.

⁸² Essa questão é discutida em detalhes mais adiante, após a descrição do Experimento 10.

a segunda⁸³.

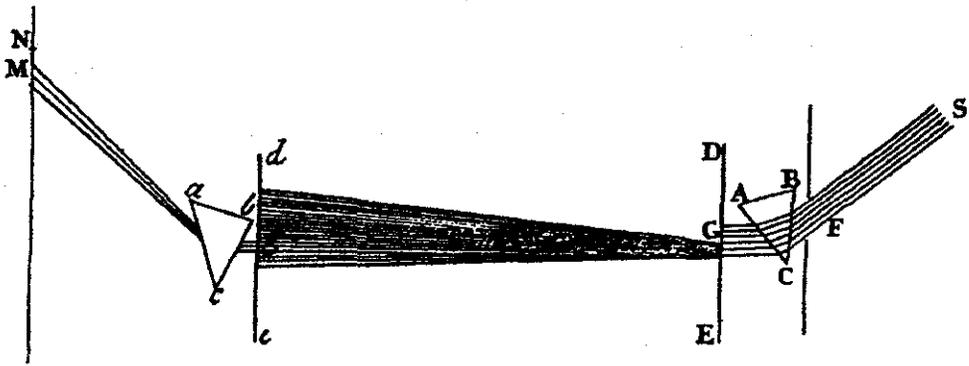


Fig. 1.18

Na verdade, esse experimento não prova as duas proposições. Prova apenas a primeira que trata da relação entre cor e refrangibilidade de luz refratada por um prisma. Não prova a segunda proposição pois Newton não provou anteriormente que a primeira refração sofrida pelo feixe de luz solar ao atravessar a primeira face do prisma não alterou as propriedades da luz solar.

Papéis do “*experimentum crucis*”

Afinal, o que esse experimento mostra? Segundo Sabra, o que o experimento prova é que a luz emergente do primeiro prisma tem propriedades diferentes da luz solar. Mas não prova que as propriedades da luz refratada existem primordialmente na luz solar. Poderia bem ser que essas propriedades fossem produzidas na luz branca pelo primeiro prisma e, uma vez geradas, não se alterassem por novas refrações.⁸⁴

Em 1672, Newton chamou esse experimento de *experimentum crucis*⁸⁵ pois para ele este experimento foi crucial para decidir se o efeito observado no Experimento 3 era devido a alguma modificação causada pelo prisma no feixe de luz, ou se era devido a alguma propriedade dos raios de luz. Observando a variação dos pontos que os raios refratados pelo segundo prisma atingiam o anteparo, Newton concluiu

(...) 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

⁸³ *Opticks*, pp. 45-6.

⁸⁴ Sabra, *Theories of light*, p. 295.

⁸⁵ O uso da expressão “*experimentum crucis*” para designar um experimento decisivo é devido à influência da obra *Novum Organon* de Francis Bacon (BACON, 1972, II, XXXV). Bacon usa a expressão *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 em que sejam previstos resultados diferentes conforme a hipótese utilizada e cuja realização mostre qual das hipóteses é a correta. Hooke cita Bacon em sua *Micrographia*, p. 54. Como provavelmente escreve de memória usa a frase errada: *experimentum crucis* ao invés de *instantiae cucis*. 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. Sobre a relação entre Newton e Bacon ver: KOYRÉ, *Études Newtoniennes*.

detectada não ser outra, senão que a *Luz* consiste em *Raios diferentemente Refrangíveis* que, sem qualquer diferença em suas incidências, foram, de acordo com seus graus de refrangibilidade, transmitidos em direção a diversas partes da parede.⁸⁶

Observando o efeito do segundo prisma no artigo de 1672, Newton percebeu que ele não alterou a cor do feixe e que as diferentes porções do espectro (diferentes cores) sofriam diferentes deflexões:

Ao mesmo grau de refrangibilidade sempre pertence a mesma cor e à mesma cor sempre pertence o mesmo grau de refrangibilidade.⁸⁷

Além disso os raios que se apresentam vermelhos são os menos refrangíveis, os que se apresentam violeta são os mais refrangíveis e os que apresentam cores intermediárias sofrem uma refração intermediária⁸⁸:

E essa analogia entre cores e refrangibilidade é muito precisa e exata; os raios sempre concordam exatamente em ambos, ou discordam proporcionalmente em ambos.⁸⁹

Em suas cartas a Lucas, Newton atribuiu ao *experimentum crucis* o papel de provar que a luz possui raios com refrangibilidades diferentes:

(...) você errou em seu discurso sobre esse experimento (...). Pois você pensa que o construi para provar que aqueles raios de cores diferentes são diferentemente refrangíveis: enquanto o construi para provar (sem respeito às cores) que luz consiste em raios diferentemente refrangíveis.⁹⁰

Já em sua resposta a Hooke, o objetivo atribuído ao experimento muda completamente:

(...) o objetivo do *experimentum crucis* é mostrar que, em incidências iguais, Raios de cores diferentes considerados separadamente sofrem refrações diferentes sem serem separados, rarefeitos ou dilatados de qualquer maneira⁹¹

No *Opticks*, Newton amenizou a importância desse experimento em relação ao atribuído a ele em 1672. Aqui o papel de provar que a luz branca é um mistura de raios é colocada discretamente. Newton não atribuiu a ele um papel especial: é mais um

⁸⁶ NEWTON 1672a, p. 51.

⁸⁷ NEWTON 1672a, p. 53.

⁸⁸ A refrangibilidade relativa das cores varia em substâncias diferentes. É possível encontrar corpos transparentes que defletem mais o vermelho e o amarelo que o azul e o violeta. Este fenômeno é conhecido como "dispersão anômala". Graças a essa variação é possível construir lentes e prismas acromáticos.

⁸⁹ NEWTON 1672a, p. 53.

⁹⁰ LUCAS 1677a, p. 257.

⁹¹ NEWTON 1672c, p. 134.

experimento dentre outros.⁹²

Newton estendeu suas observações para o que ocorre no experimento na qual a luz branca atravessa um único prisma formando uma imagem oblonga num anteparo. A explicação de Newton para o novo fenômeno é que a luz branca consiste em uma mistura de raios de todas as cores do espectro com uma refrangibilidade própria associada. Após passar pelo prisma as cores não são criadas, mas sim separadas umas das outras devido às suas diferentes refrangibilidades.

Críticas ao "experimentum crucis"

Para Lohne, a apresentação feita por Newton em 1672 de seu *experimentum crucis* é "excepcionalmente clara". Não é possível concordar com essa opinião, principalmente após a análise das críticas que se seguiram após a publicação do artigo nas *Philosophical Transactions*.

O *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, podendo ser calculado pela já conhecida lei de Snell-Descartes. Através de experimentos qualitativos pode-se estabelecer um relação entre cor e refrangibilidade que não é precisa pois pode acontecer de uma cor ser sempre a menos refratada mesmo sofrendo refrações diferentes.

Ao observarmos as refrações sofridas por um feixe vermelho e um feixe verde vemos que o vermelho é menos desviado que o verde (relação qualitativa) e que o desvio sofrido pelos raios em relação ao desvio de um raio médio, verde por exemplo, é constante (relação quantitativa). Para se estabelecer uma relação exata entre cor e refrangibilidade são necessários experimentos quantitativos. Newton não os fez.

O *experimentum crucis* também é criticado por Pardies⁹³ em sua primeira carta. Para ele, ao girar um dos prismas mantendo o outro fixo os ângulos de incidência dos diversos raios seriam diferentes e por isso esses raios sofreriam diferentes refrações:

O que o autor chama de *experimentum crucis* parece estar de acordo com as leis de refração aceitas comumente. (...) aqueles raios são erguidos ou abaixados pela rotação do primeiro prisma, o segundo permanecendo imóvel, (o que no entanto não pode ser feito em todos os casos), ou contrariamente, o segundo sendo girado e o primeiro fixo, tal que possam receber sucessivamente os raios coloridos de toda a imagem, e transmiti-los através de seu próprio buraco; pois em qualquer um dos casos é necessário que os raios extremos, isto é, o vermelho e o violeta, devam cair sobre o segundo prisma com ângulos diferentes e conseqüentemente suas refrações são

⁹² Sobre os diferentes papéis atribuídos ao experimento veja LOHNE 1968.

⁹³ Além de Pardies, Linus e Lucas, muitos franceses tentaram repetir os experimentos de Newton em vão. Edme Mariotte (1620-1684) publicou em 1681 o tratado *De la nature des couleurs* que foi tomado na França como refutação da teoria de Newton. Realizou o *experimentum crucis* e observou que os raios violetas ao passarem pelo segundo prisma se tingiam de vermelho e amarelo. Concluiu que eles eram modificados pela passagem através do prisma e portanto a teoria de Newton não poderia estar correta. Mariotte possuía uma fama de ser bom experimentador e sua refutação dos resultados de Newton contribuiu para que o trabalho óptico de Newton demorasse para ser aceito no continente. Para maiores detalhes sobre a repercussão da teoria newtoniana no continente veja GUERLAC, *Newton on the continent*.

diferentes.⁹⁴

O que Pardies argumentou não é correto pois ao girarmos um prisma mantendo o outro e os anteparos fixos os raios incidem no segundo com o mesmo ângulo. Provavelmente ele não compreendeu corretamente a descrição do *experimentum crucis*; talvez tenha pensado que os anteparos também eram móveis.

Em sua segunda carta⁹⁵, Pardies fala que não tem dúvidas de que os raios incidem com ângulos iguais no segundo prisma e comenta que isso não pode ser entendido diretamente do que Newton expôs nas *Philosophical Transactions*. Grande parte das críticas de Pardies é fruto da falta de clareza de Newton ao expôr seus experimentos e sua teoria. Quando a publicou nas *Philosophical Transactions* não apresentou figuras ou esquemas para explicar o *experimentum crucis* e não deixou explícito que o prisma foi colocado na posição de mínimo desvio. Como Pardies não enviou outras cartas criticando os resultados de Newton, podemos supor que ele concorda ao menos que raios de cores diferentes são refratados diferentemente. No *Opticks* esse problema de falta de clareza não existe. Newton apresentou detalhadamente vários experimentos para discutir cada proposição.

Lucas fez experimentos nos quais observou um disco de papel branco iluminado pela luz solar contra fundos diferentes. Viu que os espectros coloridos apareceram invertidos quando observados contra fundo negro ou contra a luz do dia. No primeiro caso, viu o violeta na parte de cima da imagem e no segundo, na parte de baixo.⁹⁶

Desse experimento pode-se pensar que a posição das cores no espectro é determinada pela relação entre a imagem e o fundo. Lucas concluiu que

De onde parece seguir que a presente situação e ordem das cores não surge de nenhuma propriedade de refrangibilidade (...) mas de circunstâncias contingentes e extrínsecas aos objetos vizinhos.⁹⁷

Problemas metodológicos

Newton não comentou os resultados experimentais de Lucas, pelo contrário, sugeriu que abandonasse esses experimentos e fez um importante comentário sobre sua metodologia:

(...) ele [Lucas] será conduzido mais rapidamente e completamente satisfeito se mudar um pouco o método que está propondo e ao invés de uma grande variedade de coisas, tentar apenas o *experimentum crucis* (...). A principal coisa a examinar é a diferente refrangibilidade da luz. E isso demonstrei pelo *experimentum crucis*. Agora se essa demonstração é boa, não há mais necessidade de examinar outras coisas (...).⁹⁸

Lucas respondeu

⁹⁴ PARDIES 1672a, p. 89.

⁹⁵ PARDIES 1672b, pp. 104-5.

⁹⁶ LUCAS 1676a, p. 11.

⁹⁷ LUCAS 1676a, p. 11.

⁹⁸ LUCAS 1676a, pp. 173-4.

Isso eu concebo que a razão do porque vários membros da Royal Society basearam novas Teorias sobre o *Número* de experimentos, particularmente o genial Mr. Boyle (...).⁹⁹

Lucas acreditava estar defendendo o método Baconiano indutivo. De seus próprios experimentos viu que sob incidências iguais a diferença de cores raramente estava ligada a refrações diferentes. Portanto, poderia ser que a explicação de Newton para o *experimentum crucis* não fosse correta.

Para Westfall¹⁰⁰, as críticas de Lucas "demonstram uma falha em compreender a verdadeira natureza da investigação experimental (...) e mostra o quão pouco ele entendeu o que Newton estava dizendo".

Para Newton, o *experimentum crucis* é o que prova além de qualquer dúvida a verdade da sua teoria, igualando-se a uma demonstração matemática. Sobre essa posição de Newton, Gruner comentou:

Esse procedimento é freqüentemente elogiado como a triunfante defesa de Newton do método experimental. É difícil ver como esse pode ser o caso. Pode-se mostrar sempre que *um* experimento tem a força de uma demonstração matemática? (...) Em caso algum é sugerido que um experimento poderia revelar a verdade completa sobre um grande fenômeno natural como a luz e cores. Além disso, nossa idéia de *experimentum crucis* é seguramente de um experimento que decide sobre a natureza da luz.¹⁰¹

Experimento 7.

Esse experimento é semelhante ao primeiro e segundo experimentos apresentados para provar a Proposição 1, com a diferença que Newton estudou a luz refratada por prismas e não a refletida por objetos. Observou através de um prisma uma tira de papel branca com uma metade iluminada com luz violeta e a outra metade iluminada com luz vermelha provenientes de outros dois prismas. Viu através do prisma que a metade iluminada pela luz violeta aparecia separada da metade vermelha.

Esse experimento é exatamente igual ao quinto experimento sugerido por Lucas em sua carta de 1676 questionando os resultados experimentais de Newton. Lucas fez esse experimento para testar a nova teoria proposta em 1672 por Newton e, como Newton, usou cores não compostas:

Tendo lançado duas Imagens coloridas sobre a Parede, tal que a cor Escarlate de uma [imagem] caiu em uma linha reta paralela à Violeta de outra [imagem] (paralela ao Horizonte): então olhei para ambas através de um outro Prisma, e encontrei-as ainda aparecendo em uma linha reta paralela ao Horizonte, como estavam inicialmente a olho nu. De acordo com a Asserção do Sr. *Newton* sobre diferente refrangibilidade em diferentes Raios, concebi que os raios Violetas deveriam sofrer uma refração maior pelo Prisma no olho que os Escarlates e, conseqüentemente ambas as cores não

⁹⁹ LUCAS 1676b, p. 105.

¹⁰⁰ WESTFALL 1966, p. 306.

¹⁰¹ GRUNER 1973, p. 319.

deveriam aparecer em uma linha reta paralela ao Horizonte.¹⁰²

Lucas não informou se tomou algum cuidado para que a luz ambiente não interferisse no experimento, tornando os efeitos menos significativos. Para evitar esse tipo de problema, Newton deixou claro no *Opticks* que tomou os cuidados necessários:

(...) cobri a Parede com um Pano preto além do Papel, tal que nenhuma Luz poderia ser refletida da parede para perturbar o Experimento (...).¹⁰³

Além do pano preto, também é necessário estar distante do papel pois

(...) quando observei o papel muito perto da mão, as duas metades do Papel não apareceram completamente divididas uma da outra, mas pareceram contínuas em seus Ângulos como o Papel pintado no primeiro Experimento (...).¹⁰⁴

Newton fez uma pequena variação nesse experimento. Fez os espectros produzidos por dois prismas (figura 1.17) coincidirem com suas cores em ordem invertida:

Fiz também os Espectros coloridos *PT* e *MN* formados em um Quarto escuro pelas Refrações de dois Prismas permanecerem final com final em uma Linha Reta, como descrito acima no quinto Experimento e vendo-os através de um terceiro Prisma mantido paralelo a seus Comprimentos, não mais apareceram em uma Linha Reta, mas tornaram-se quebrados um do outro, como estão representados em *pt* e *mn*, o final violeta *m* do Espectro *mn* sendo por uma Refração maior mais deslocado de seu Lugar inicial *MT* que o final vermelho *t* do outro Espectro *pt*.¹⁰⁵

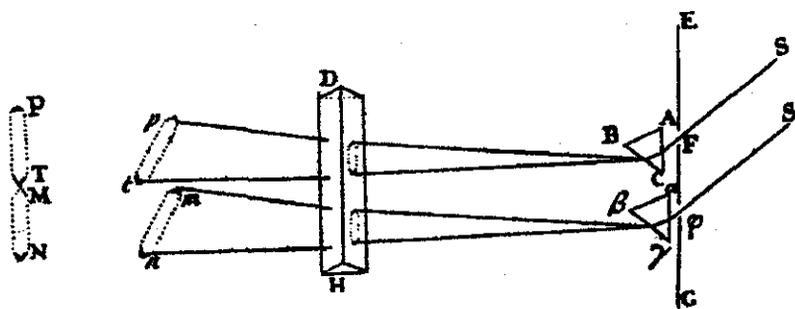


Fig. 1.17

Segundo Newton, esse experimento mostra que

(...) o vermelho de um Espectro e o violeta de outro, que eram coincidentes em *PN* e *MT*, sendo separados um do outro por uma Refração maior do violeta para *p* e *m* que o vermelho em *n* e *t*, diferem em graus de

¹⁰² LUCAS 1676a, p. 10.

¹⁰³ *Opticks*, p. 48.

¹⁰⁴ *Opticks*, p. 49.

¹⁰⁵ *Opticks*, p. 50.

O Experimento 7 mostra que a luz branca ao ser refratada por um prisma produz um espectro formado por várias cores que são, de acordo com seus graus de refrangibilidade, refratados de quantidades diferentes.

Algumas vezes Newton usou uma linha branca como anteparo para a luz proveniente dos dois prismas (figura 1.19):

Se uma das metades da Linha for constantemente iluminada com vermelho, e a outra metade for iluminada com todas as Cores sucessivamente (o que pode ser feito girando-se um dos Prismas em torno de seu Eixo enquanto o outro permanece imóvel), essa outra metade da Linha vista através do Prisma aparecerá em uma Linha reta com a primeira metade quando iluminada com vermelho, e começará a ser um pouco dividida da metade vermelha quando iluminada com amarelo e ainda mais quando [iluminada] por verde, e mais quando [iluminada] por azul, e ainda mais quando iluminada por Índigo e o máximo quando iluminada com violeta profundo.¹⁰⁷

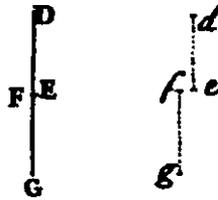


Fig. 1.19

Para Newton, esse experimento

(...) mostra claramente que as Luzes de várias Cores são umas mais e mais refrangíveis que outras, nessa Ordem de suas Cores, vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, índigo, violeta profundo; e assim prova tão bem a primeira Proposição quanto a segunda.¹⁰⁸

Newton apresentou uma variação desse experimento impossível de ser realizada (figura 1.20). Fez dois espectros invertidos PT e MN coincidirem, de tal modo que a extremidade vermelha de um coincidissem com a violeta do outro. Observou os espectros através de um prisma DH e viu que os espectros *pt* e *mn* deixavam de coincidir.

¹⁰⁶ *Opticks*, p. 51.

¹⁰⁷ *Opticks*, p. 49-50.

¹⁰⁸ *Opticks*, p. 50

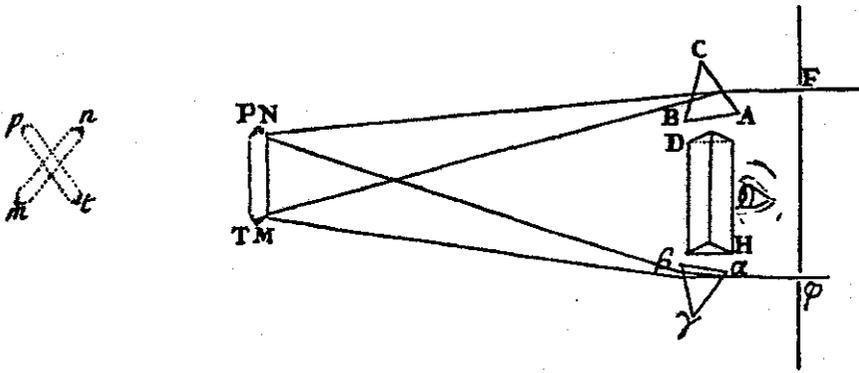


Fig. 1.20

Defendemos que esse experimento é impossível pois, de acordo com as considerações de Newton, a deflexão dos raios que atravessavam os prismas é de aproximadamente 45° e a distância necessária para se observar nitidamente o espectro colorido é da ordem de alguns metros, e assumindo-se que os prismas ABC e $\alpha\beta\gamma$ estavam próximos um do outro, como mostra a figura 1.20, os espectros PT e MN se encontram a uma distância muito pequena do prisma DH e por isso não podem ser distinguidos quando observados através de DH.

Para que os espectros possam ser vistos separadamente através de DH, é necessário que a distância $F\phi$ seja muito grande. Como Newton não comentou nada sobre ter usado a luz proveniente de duas janelas muito distantes e também pela observação da figura 1.20, concluimos que esse experimento é impossível de ser realizado conforme a descrição de Newton e afirmamos que Newton apenas *imaginou* esse experimento sem realizá-lo.

Experimento 8.

Nesse experimento Newton fez uma parte do espectro solar incidir sobre uma página de um livro e observou a luz refletida pelo livro através de uma lente convergente. Notou que pelo movimento do Sol, e conseqüente movimento de seu espectro sobre o livro, todas as cores do vermelho até o violeta passavam sobre suas letras; e que a distância de um papel até a lente necessária para que as letras aparecessem nítidas variava de acordo com a cor que iluminava as letras do livro. Quando o livro era iluminado por violeta, a distância entre a lente e o papel era menor do que quando iluminado por vermelho.

A sala onde o experimento foi realizado era bem escura para que a luz ambiente não interferisse no experimento, tornando a distância entre os focos do azul e do vermelho menor. A pureza e intensidade das cores também influenciam nos resultados observados pois as cores do prisma são mais intensas e vivas que as cores refletidas pelos corpos naturais e a diferença entre os focos para as diferentes cores se faz mais perceptível.

Experimento 9.

Até esse experimento, Newton não havia tocado no ponto principal da Proposição II, isto é, não havia provado que a luz do Sol é uma mistura de raios de diferentes

refrangibilidades. Para tentar provar isso, Newton observou um feixe de luz solar entrando através do buraco F em um quarto escuro que atravessava um prisma ABC. Girando esse prisma em torno de seu eixo fez com que toda a luz refratada pela primeira face do prisma fosse sucessivamente refletida pela base BC e novamente refratada para fora do prisma.

Dependendo do ângulo utilizado, uma parte da luz era refletida na base, e outra parte passava - e esses feixes eram de cores diferentes. O feixe que saía pela base do prisma formava um espectro em uma parede distante, e à medida que o prisma era girado uma parte desse espectro ia desaparecendo. Os raios mais refratados eram os primeiros a serem refletidos totalmente e a desaparecer do espectro formado pelo feixe MHG.

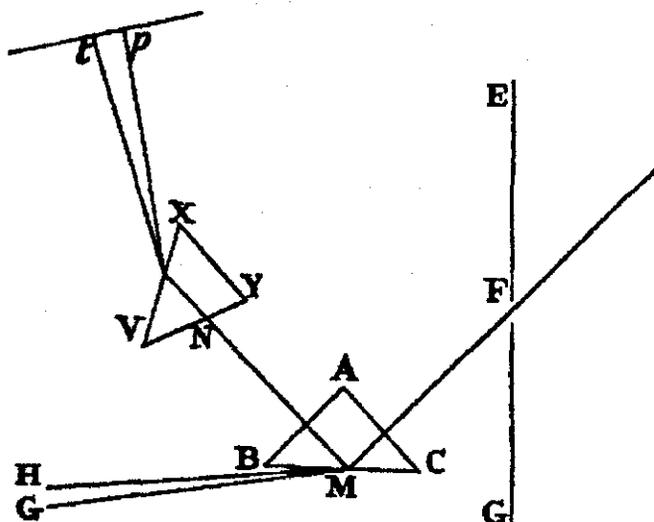


Fig. 1.21

Newton supôs que a reflexão não alterava as características dos raios luminosos e imaginou que os raios da luz refletida mantinham a propriedade de serem refratados de quantidades diferentes após saírem do prisma ABC.

Para testar sua hipótese, fez a luz refletida pelo prisma ABC atravessar um segundo prisma VXY e incidir num pedaço de papel branco colocado além dele. Girou o primeiro prisma ao redor de seu eixo e viu que os raios mais refratados (raios azuis e violeta) começaram a ser totalmente refletidos antes dos que foram menos refratados (raios amarelos e vermelhos)¹⁰⁹.

Na medida que o prisma ABC refletia as várias cores, elas desapareciam de seu espectro HG e apareciam no espectro *pt*. Todas as cores refletidas pelo prisma ABC foram refratadas pelo prisma VXY e atingiram um papel branco, formando sobre ele um espectro colorido igual ao formado pela incidência da luz solar em um único prisma.¹¹⁰

Para Newton, esse experimento mostrou que a luz refletida pela base do prisma é uma mistura de raios:

De onde se manifesta que o Feixe de Luz refletido pela Base do Prisma é

¹⁰⁹ O ângulo crítico de reflexão i ocorre quando um raio refratado é paralelo à superfície, ou quando $\text{sen } i = 1/n$. Como $n_p > n_r$, os índices p e t representam o extremos azul e vermelho, respectivamente. Então $i_p < i_r$, e o azul será refletido primeiro que o vermelho.

¹¹⁰ Esse experimento já havia sido proposto para mostrar a composição da luz solar no *Optical lectures*, p. 129.

composto por Raios de diferentes refrangibilidades, sendo primeiro aumentado pelos Raios mais refrangíveis e depois pelos menos refrangíveis.¹¹¹

Sustentamos que a partir disso, Newton deu um salto conceitual perfeito, mas que não pode ser justificado por esse experimento pois fez uma suposição errada. Supôs que a luz solar incidiu perpendicularmente na primeira e segunda faces do prisma ABC e por isso não sofreu nenhuma refração e, conseqüentemente, nenhuma alteração em suas propriedades:

E que toda Luz refletida [pela base do prisma ABC] é da mesma Natureza que a Luz do Sol antes da Incidência na Base do Prisma, nenhum Homem nunca duvidou; sendo geralmente aceito que Luz por tais Reflexões não sofre Alterações em suas Modificações e Propriedades. Não levo em conta aqui: qualquer Refração nas faces do primeiro Prisma, porque a Luz entra em sua primeira face perpendicularmente e sai perpendicularmente na segunda face, e portanto não sofre nenhuma [refração].¹¹²

Logo, a luz refletida pela base do prisma tem a mesma natureza que a luz solar:

Então, a Luz do Sol incidente sendo do mesmo Temperamento e Constituição que a Luz emergente, e a última sendo composta de Raios diferentemente refrangíveis, a primeira deve ser composta da mesma maneira.¹¹³

O Experimento 9 não pode ser usado para justificar a igualdade entre a luz refletida e a luz solar pois somente em *uma* posição a luz solar incide perpendicularmente no prisma ABC. Como o próprio Newton informou, ele girou o primeiro prisma em torno de seu eixo para que todos os raios fossem refletidos por sua base. Após girar o prisma, a luz solar deixa de incidir perpendicularmente em sua primeira face, por isso é refratada, podendo, assim, ter suas propriedades alteradas por essa refração. Se existe essa possibilidade não faz sentido comparar- e muito menos igualar - os dois tipos de luz.

Uma maneira de aproveitar a idéia do experimento para justificar o raciocínio feito por Newton para igualar a luz refletida pelo prisma com a luz solar, seria o uso de vários prismas com ângulos diferentes para cada cor a ser estudada. Cada raio refletido seria estudado individualmente através do uso desses prismas que tornariam possível a luz branca incidir perpendicularmente na primeira face e cada cor ser refletida totalmente pelo primeiro prisma e refratada pelo segundo.

Experimento 10.

Esse experimento procura aperfeiçoar o experimento anterior.

¹¹¹ *Opticks*, p. 55.

¹¹² *Opticks*, p. 55.

¹¹³ *Opticks*, p. 56.

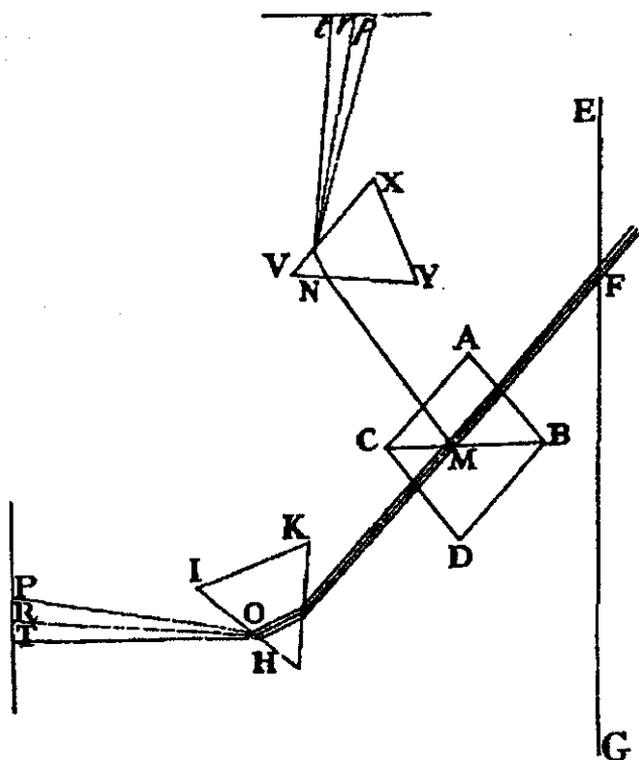


Fig. 1.22

Newton utilizou um outro prisma BCD igual ao prisma ABC, formando com os dois um paralelepípedo usado para cancelar os efeitos de refração causados por um único prisma.

Fez a luz solar atravessar esse paralelepípedo e ser refratada por um outro prisma HJK que projeta o espectro no anteparo PT. Girou o paralelepípedo até a base BC ser suficientemente oblíqua para refletir os raios FM. Esses raios começaram a ser totalmente refletidos para N; primeiro os mais refrangíveis (azul e violeta) foram totalmente refletidos e, conseqüentemente, desapareceram de PT. Conforme o paralelepípedo foi girado em torno de seu eixo, os outros raios também foram refletidos para N e desapareceram de PT.

Segundo Newton, esse experimento mostra que a luz solar é composta pois

Como os Planos AB e CD são paralelos, e portanto por Refrações iguais e contrárias destroem os Efeitos um do outro, a Luz incidente FM deve ser do mesmo Tipo e Natureza que a luz emergente MO, e portanto também consiste em Raios diferentemente refrangíveis. Antes dos Raios mais refrangíveis serem separados da Luz emergente MO, essas duas Luzes FM e MO concordam em Cor, e em todas as outras Propriedades tanto quanto minhas Observações atingiram, (...) e por Conseqüência uma é composta tanto quanto a outra.¹¹⁴

Na realidade, não é possível dizer que os efeitos da refração no primeiro prisma são anulados pela presença do segundo prisma. No caso em que o feixe FM incide perpendicularmente no prisma ABC, o feixe não sofre refração e também nenhuma

¹¹⁴ *Opticks*, p. 60.

possível mudança de suas propriedades. Mas, após o prisma ser girado ao redor de seu eixo, a incidência não é mais normal podendo, assim, ocorrer modificações no feixe que seriam responsáveis pela presença das cores.

O ponto central do argumento newtoniano é o fato de que imediatamente após uma certa cor ser refletida pela face BC, ela desaparece do espectro PT, indicando que estava presente no feixe FM. Mas não é bem isso que esse desaparecimento das cores indica, como discutimos no experimento anterior.

O que podemos afirmar seguramente é que as cores estavam presentes *dentro* do prisma ABC e nada podemos afirmar sobre elas estarem presentes *antes* do prisma. Isso pois o feixe FM foi refratado pela primeira face do prisma e poderia eventualmente sofrer mudanças que seriam responsáveis pelo aparecimento das cores. Não há uma maneira segura de conhecermos a natureza da luz branca nesse tipo de experimento onde a luz é refratada ao menos uma vez, pois sempre existe a possibilidade de a luz solar ter sido modificada pela refração.

Por outro lado, mesmo quando a incidência do feixe FM é normal à primeira face AB do prisma, só se poderia afirmar que os feixes FM e MO são iguais se nada tivesse acontecido entre as faces AB e CD; mas entre elas houve a passagem por uma superfície oblíqua CB, que produziu desvio da luz.

Shapiro¹¹⁵ comentou que nesses experimentos o objetivo de Newton não era provar experimentalmente que as cores são inatas na luz direta do sol invocando a reflexão total. Ao invés disso, Newton escolheu a certeza de uma prova lógica baseada na imutabilidade das cores. Reduzida à sua essência, a prova newtoniana é elegante e decididamente simples: como as cores são imutáveis, e a luz do sol exibe cores após a refração, então necessariamente segue que tais cores já estavam presentes na luz do sol antes da refração. Essa prova de que as cores são inatas a luz do sol, elucida o desejo de Newton de uma demonstração experimental da imutabilidade da luz solar antes da refração.

Resumo dos argumentos sobre a Proposição II

Ao final do Experimento 10, Newton faz uma revisão de todos os experimentos que havia apresentado até esse ponto, para tentar mostrar como eles se reforçam mutuamente e também tentar estabelecer sua Proposição II - que os raios do Sol são uma mistura heterogênea de raios de diferentes refrangibilidades.

Segundo Newton, todos os experimentos mostraram que "sempre foram encontrados raios que, com iguais incidências no mesmo meio, sofreram refrações desiguais". Os diversos experimentos mostraram isso para diferentes situações:

- com luz refletida por corpos naturais (Experimentos 1 e 2);
- com luz refletida especularmente (Experimento 9);
- com luz refratada, antes que os raios de diferentes cores se separassem (Experimento 5);
- com luz refratada, depois da separação das cores (Experimentos 6,7,8);
- com luz que atravessou superfícies paralelas (Experimento 10).

Além disso, o efeito observado não podia ser atribuído à dilatação dos raios, nem a uma desigualdade contingente das refrações (Experimentos 5 e 6).

Os raios que diferem em refrangibilidade podem ser separados:

¹¹⁵ *Optical lectures*, p. 145, nota 33.

- por refração (Experimento 3); ou
- por reflexão (Experimento 10).

Os raios, depois de separados, com incidências iguais sofrem refrações diferentes, e os que foram mais refratados antes da separação são mais refratados depois (Experimentos 6,7,8).

Se a luz do Sol passar por três ou mais prismas cruzados sucessivamente, os raios mais refratados no primeiro prisma são também mais refratados nos seguintes, na mesma proporção (Experimento 5).

De tudo isso, Newton concluiu:

Torna-se manifesto que a Luz do Sol é uma Mistura heterogênea de Raios, alguns dos quais são constantemente mais refrangíveis do que outros, como havia sido proposto¹¹⁶.

Nessa revisão, Newton se refere a todos os experimentos, exceto o número 4 (que é equivalente ao Experimento 3). Através da variedade de circunstâncias, ele procurou reforçar a conclusão central. Há, no entanto, um ponto que sempre pode ser questionado: por que motivo se deveria aceitar que os raios coloridos, que diferem em refrangibilidades *já existiam* na luz branca e não foram *produzidos* no experimento?

É a luz branca uma mistura de raios? As críticas de Hooke

Esse mesmo tipo de questionamento foi feito por vários contemporâneos de Newton, entre eles Hooke, Huygens e Pardies¹¹⁷. Vamos nos ater à discussão entre Newton e Hooke. De um modo geral, Hooke não questionou os resultados experimentais de Newton, mas sim a nova hipótese de composição da luz branca introduzida por Newton para explicar os seus experimentos. Hooke acreditava que todos os experimentos de Newton, inclusive o *experimentum crucis*, poderiam ser explicados por sua própria hipótese.

Para Hooke a luz branca é um tipo de vibração (não periódica) e a luz colorida corresponde a modificações que o prisma imprime na luz branca. Em um meio homogêneo *LLL* (figura vi), a luz seria constituída por uma série de frentes de onda (“pulsos orbiculares”) *AD*, *BE*, *CF* perpendiculares à direção *ABC* de propagação dos raios. Quando a luz incide obliquamente num meio refringente, segundo Hooke, a frente de onda se torna inclinada em relação à direção de propagação¹¹⁸. Se o segundo meio *MMM* for mais refringente do que o primeiro, como na passagem da luz do ar para o vidro, o feixe se aproximará da normal como o raio *HK* da figura v. Se o meio *MMM* for menos refringente, o feixe se afastará da normal, como o raio *RT* da figura. Em ambos os casos, haveria uma inclinação da frente de onda em relação à direção dos raios.

¹¹⁶ *Opticks*, p. 63.

¹¹⁷ Para uma boa discussão sobre esses questionamentos veja SABRA, *Theories of light*, cap. 10.

¹¹⁸ HOOKE, *Micrographia*, pp. 57-8.

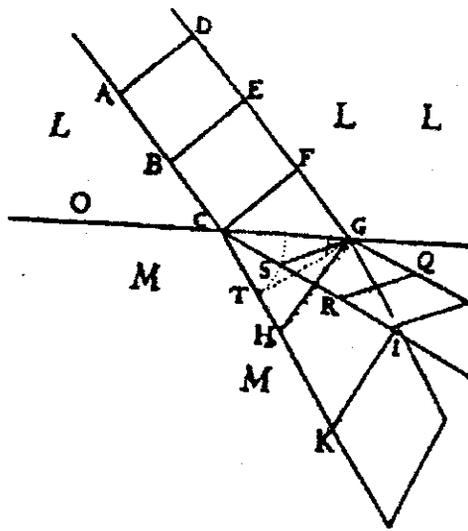


Fig. vi

Os dois lados de um feixe luminoso refratado, ao penetrarem em uma região escura, produziram diferentes efeitos à sua volta (figura vii). Hooke explica o surgimento das cores mecanicamente atribuindo aos raios refratados uma certa propriedade física imposta pelo meio refrator. O feixe de luz refratado tem dois lados ou duas partes: uma que se propaga na frente e que é enfraquecida e outra que se segue e que é fortalecida. O meio refrator não perturbado é o responsável por esse enfraquecimento dos raios. Os raios nos quais predomina a parte enfraquecida são dispostos a exibir o azul, sendo que o azul é mais intenso na região próxima da região escura do meio. Enquanto que os raios nos quais predomina a parte fortalecida exibem a cor vermelha, sendo o vermelho próximo da fronteira do feixe mais intenso. O amarelo e as tonalidades de azul são efeitos da variação de intensidade dos raios vermelho e azul, respectivamente. O resultado da intersecção desses raios azuis e vermelhos com intensidades diferentes são as cores intermediárias.

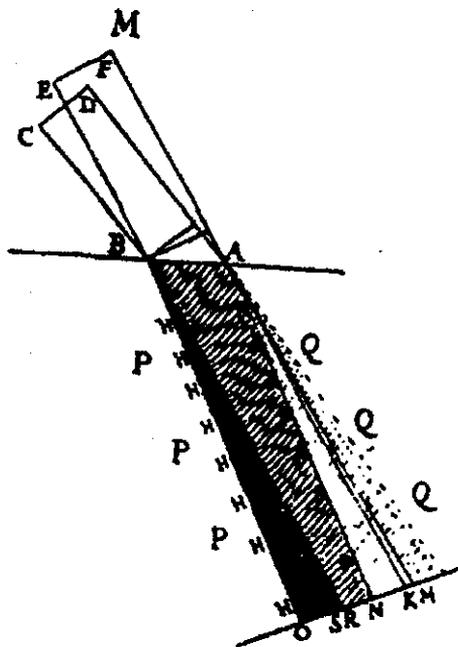


Fig. vii

Segundo a descrição de Hooke, o feixe incidente, ABCD, irá se inclinar ao passar pela superfície separadora entre os dois meios, como se viesse da direção ABEF. O feixe refratado é agudo do lado PP e obtuso do lado QQ, por causa da inclinação das frentes de onda em relação à propagação dos raios. Por isso, segundo Hooke,

(...) o raio AAAHB terá seu lado HH mais amortecido pela resistência do meio escuro ou em repouso PPP e por isso haverá um tipo de amortecimento superposto sobre o lado HHH, que aumentará continuamente a partir de B, e atingirá cada vez mais profundamente no Raio pela linha BR; por isso todas as partes do triângulo RBHO serão de uma cor *Azul* amortecida, e tão mais profunda, quanto mais próximas estiverem à linha BHH, que é a mais amortecida ou impedida, e tão mais diluída quanto mais próxima estiver da linha BR. Em seguida, no outro lado do Raio AAN, a extremidade A do pulso AH será realçada, ou tornada mais forte, tendo sua passagem já preparada, por assim dizer, pelas outras partes que precedem, e assim sua impressão será mais forte. E por causa de sua *obliquidade* em relação ao Raio, propagará um tipo de movimento fraco em QQ, o meio adjacente escuro ou em repouso, movimento fraco este que se espalhará cada vez mais longe em QQ quando o Raio se propaga mais e mais de A, a saber, até a linha MA, e por isso todo o triângulo MAN será tingido com um *Vermelho* e esse *Vermelho* será mais profundo quanto mais próximo estiver da linha MA, e mais *pálido* ou *amarelado* quanto mais próximo estiver da linha NA. E se o Raio for prolongado, de tal modo que as linhas AN e BR (que são os limites do *Vermelho* e do *Azul diluídos*) se encontram e se cruzam um com o outro, haverá além dessa intersecção a geração de todos os tipos de

Sempre que houvesse refração, portanto, haveria aparecimento de cores. As cores aparecem na limitação entre o feixe e o escuro, ou seja, nas bordas do feixe - o lado em que a extremidade da frente de onda está na frente torna-se azul e a outra extremidade vermelha.

A teoria de Hooke dá conta daquilo que se observa em experimentos com prismas. Quando se observa o feixe refratado próximo ao prisma, vê-se um feixe branco, com bordas azul e vermelha. As outras cores do espectro são observadas longe do prisma e, segundo Hooke, são resultado da mistura entre o azul e o vermelho em diferentes proporções:

[Luz branca] nada mais é que um pulso ou movimento, propagado através de um meio homogêneo, uniforme e transparente: e as Cores nada mais são que Distúrbios dessa luz causados pela comunicação desse pulso a outro meio transparente, isto é, pela sua refração: que brancura e negritude nada mais são que plenitude ou escassez dos Raios de luz não perturbados: e que duas cores [azul e vermelho] (não há nada mais não-composto na Natureza que elas) são nada mais que efeitos do pulso composto, ou distúrbios do movimento causados pela Refração.¹²⁰

Como bem apontou Sabra¹²¹, apesar de Hooke dizer que o azul e o vermelho são cores não compostas deve-se observar que para Hooke o conceito de cores compostas é diferente do sentido newtoniano. Para Hooke elas são "efeitos do pulso composto (...) causados pela refração". Para ele, o vermelho e o azul são simples relativamente às outras cores que seriam compostas pela mistura de azul e vermelho.

A explicação mecânica de Hooke não é satisfatória pois não deixa claro qual é a propriedade do meio que faz com que o pulso de luz homogêneo adquira características diferentes ao ser refratado. Também não explica o que é essa nova propriedade adquirida pelo pulso refratado. Além disso, Hooke não explica como as partes do pulso que se propagam mais fortemente que outras podem ter a mesma velocidade. Apesar de tudo isso, era uma teoria importante na época.

Em seu artigo de 1672, Newton apresentou um experimento onde combinou as cores produzidas pelo prisma através do uso de uma lente convergente para mostrar que a luz branca pode ser obtida pela combinação desses raios coloridos:

(...) todas as Cores do Prisma feitas convergir, e assim serem novamente misturadas como estavam na luz antes de incidir no Prisma, reproduziram luz inteiramente e perfeitamente branca, e em nada diferindo sensivelmente da Luz *direta* do Sol, a menos quando o vidro usado não era suficientemente claro (...)¹²²

Quando o vidro usado não é perfeitamente claro a luz resultante será de uma cor próxima à cor do vidro.

¹¹⁹ HOOKE, *Micrographia*, pp. 63.

¹²⁰ HOOKE 1672a, p. 111.

¹²¹ SABRA, *Theories of light*, p.254.

¹²² NEWTON 1672a, p. 55

Em suas considerações¹²³ sobre a nova teoria de Newton, Hooke descarta a necessidade da introdução de novas hipóteses para explicar os fenômenos. Ele explica esse experimento usando sua própria hipótese de modificação da luz. Segundo Hooke, quando os raios modificados se encontram no foco da lente seus efeitos se anulam resultando num pulso simples e homogêneo como o inicial, isto é, um raio de luz branca.

Hooke também explica o experimento que utiliza dois prismas invertidos para produzir luz branca através de sua teoria. Antes da luz branca atravessar o primeiro prisma ela é um pulso simples e não perturbado. Quando atravessa o primeiro prisma uma multiplicidade de vibrações diferentes é gerada e, assim, surgem as cores. Ao atravessar o segundo prisma o pulso perturbado é refratado novamente numa direção oposta. Desse modo as vibrações adquiridas na primeira passagem pelo prisma são destruídas e o pulso retoma sua simplicidade original, ou seja, a cor branca.

Aceitar a heterogeneidade da luz branca implica em aceitar que as cores estão presentes na luz branca independentemente de sua passagem por um meio refrator. Hooke acha desnecessário supor que os movimentos diferentes que caracterizam os raios de diferentes cores já estejam presentes na luz branca. Como argumento usa uma analogia entre luz e som, muito comum na época. Quando se trata do som numa corda ou nos foles de um órgão não é necessário supor que os sons estejam presentes na corda antes dela ser tocada pelos dedos, ou presentes no ar do fole antes que ele seja soprado.

Hooke, em sua analogia entre luz e som, compara a luz branca com a corda esticada; o meio refrator com os dedos que tocam a corda. Defendemos que essa analogia não funciona, pois não é possível unir dois sons diferentes e produzir um terceiro que difira sensivelmente de ambos, como se faz com a mistura de duas cores diferentes. Quando misturamos dois sons próximos um acorde cujas notas constituintes podem ser distinguidas por pessoas de ouvido treinado. Além disso, comparar a corda esticada com a luz branca também não funciona, pois uma vez que a corda está parada não é possível que ela volte a se mover sem a intervenção de um agente externo (dedos, por exemplo); enquanto que, pela convergência de raios através de uma lente, a luz branca se forma no foco, mas após esse ponto as cores são observadas novamente sem a necessidade da ação de um meio externo. A analogia correta seria comparar a luz branca a um "som branco" (o que obviamente não existe), as vibrações do ar às vibrações do éter e os dedos ao meio refrator.

Como bem observou Sabra¹²⁴, a explicação de Hooke para a formação de branco através da união de todas as cores - as diferentes vibrações, causadas pela primeira refração, agem umas sobre as outras anulando-se mutuamente - contém uma expressão da idéia, que será desenvolvida posteriormente, do princípio da superposição de ondas. Hooke estava apto a conceber a idéia de luz branca como composição de vários movimentos diferentes, só não o fez pois estava satisfeito com sua teoria dualística. Por outro lado, para estudar matematicamente a superposição de ondas havia a necessidade do desenvolvimento do aparato matemático (o teorema de Fourier), inexistente na época.

PROPOSIÇÃO III

A Luz do Sol consiste em Raios diferindo em Reflexibilidade e aqueles Raios que são mais reflexíveis são mais refrangíveis.

¹²³ HOOKE 1672a, pp. 110-115.

¹²⁴ SABRA, *Theories of light*, p. 260-1.

Na Definição III, no início do *Opticks*, Newton havia definido a "reflexibilidade" da seguinte forma:

Reflexibilidade dos raios é sua disposição a serem refletidos ou desviados de volta para o mesmo meio, por qualquer outro meio sobre cuja superfície eles caírem. Os raios que são desviados de volta mais ou menos facilmente são mais ou menos reflexíveis.¹²⁵

Antes de serem totalmente refletidos pelos prismas nos Experimentos 9 e 10, os raios foram parcialmente refletidos por estes prismas. Os raios azuis e violetas foram mais intensamente refletidos que os vermelhos e amarelos, e portanto os raios de maior refrangibilidade eram os mais reflexíveis.¹²⁶

PROPOSIÇÃO IV

Separar uns dos outros os Raios heterogêneos da Luz composta.

Na Definição VII, Newton definiu luz composta (ou heterogênea) da seguinte forma:

A Luz cujos Raios são todos igualmente Refrangíveis, chamo Simples, Homogênea e Similar; e aquela cujos Raios são mais Refrangíveis que outros, chamo Composta, Heterogênea e Desigual.¹²⁷

Nos experimentos feitos com raios de uma única cor, é muito importante que a luz utilizada seja o mais homogênea possível. Nessa proposição, Newton ensinou como melhorar a definição do espectro colorido formado em experimentos com prismas do tipo dos Experimentos 3 e 5. Supôs que o espectro é composto por inúmeros círculos coloridos que correspondem a cada cor presente na luz solar; a forma circular é devida à forma do disco solar.

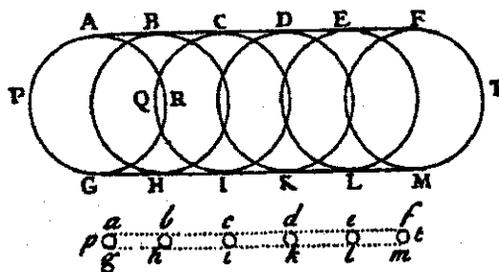


Fig. 1.23

A figura 1.23 mostra que os círculos AG, BH, DK, EL, FM se superpõem uns sobre os outros, formando regiões como QR que recebem contribuições de vários

¹²⁵ *Opticks*, p. 3.

¹²⁶ Em linguagem moderna, diríamos que os raios que sofrem a maior variação de velocidade ao atravessarem a separação entre dois meios materiais e são os mais refletidos pela interface.

¹²⁷ *Opticks*, p. 4.

círculos diferentes, em um espectro contínuo entre os dois lados paralelos da imagem oblonga do Sol *PT*. Os círculos menores *ag*, *bh*, *ci*, *dk*, *el*, *fm* e muitos outros, formam um outro espectro *pt*, em que as cores se apresentam mais separadas.

Na Figura *PT* composta por Círculos maiores, três daqueles Círculos *AG*, *BH*, *CJ* se estendem tanto uns nos outros, que os três tipos de Raios pelos quais aqueles Círculos são iluminados, juntos com inumeráveis outros tipos de Raios intermediários, são misturados em *QR* no meio do círculo *BH*. E tal Mistura ocorre em quase todo o comprimento da Figura *PT*.¹²⁸

A natureza da luz solar poderia ser melhor estudada caso a mistura entre os raios diminuísse e eles pudessem ser estudados com a menor mistura possível, como representado pela figura *pt*:

Mas na Figura *pt* composta por Círculos menores, os três pequenos Círculos *ag*, *bh*, *ci*, que correspondem àqueles três maiores, não se estendem uns sobre os outros; nem sequer são misturados dois dos três tipos de Raios pelos quais esses Círculos são iluminados, e que na Figura *PT* são todos misturados em *BH*.¹²⁹

Isso ocorre pois a mistura de raios diminui na mesma proporção que os diâmetros dos círculos. Como diminuir esse diâmetro e, portanto, a largura do espectro, sem alterar seu comprimento? A largura do espectro é determinada pelo ângulo subtendido pela fonte de luz (se o diâmetro do furo for desprezível). Newton sugere o uso de dois furos sucessivos (um tipo de colimador). No entanto, ele propõe no experimento seguinte o uso de uma lente para focalizar a luz solar na parede ou anteparo.

Experimento 11.

Newton fez um feixe de luz solar entrar no quarto escuro por um buraco *F* em sua janela e focalizou esse feixe com uma lente *MN* sobre um papel, formando a imagem *J*. Após a lente, colocou um prisma *ABC* que refratou os raios provenientes do buraco. Os raios refratados pelo prisma formaram a imagem *pt* sobre um papel branco, mostrada na figura 1.24. O papel branco foi colocado a uma certa distância da lente tal que seus lados paralelos aparecessem bem distintos.

¹²⁸ *Opticks*, pp. 65-6.

¹²⁹ *Opticks*, p. 66.

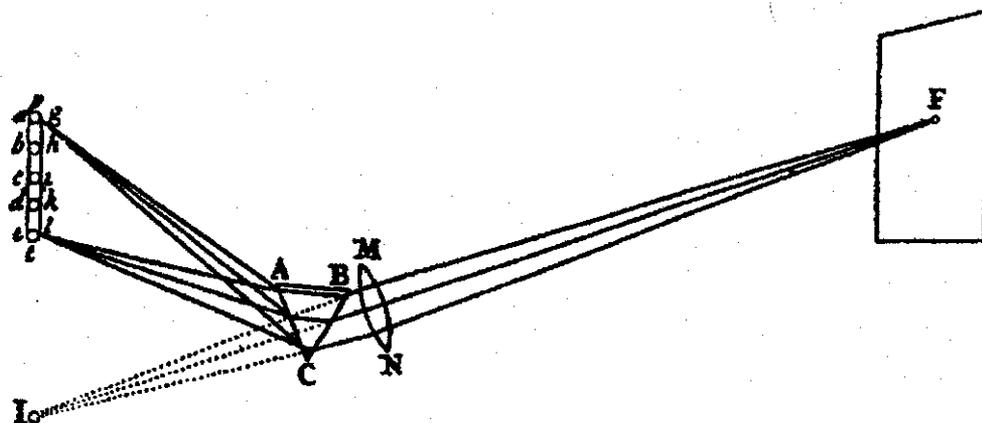


Fig. 1.24

Nessa situação, o tamanho da imagem formada pela lente e, portanto, o tamanho de cada círculo, será proporcional ao tamanho do buraco e por isso é possível diminuir a mistura entre os círculos coloridos através da diminuição do tamanho do buraco F:

Por esse meio formei uma Imagem oblonga (como *pt*) [nas Figs. 1.23 e 1.24] de Imagens Circulares do Buraco (tais como *ag*, *bh*, *ci*, etc) e usando um Buraco maior ou menor na Janela, fiz as Imagens Circulares *ag*, *bh*, *ci*, etc pelas quais era formada tornarem-se maiores ou menores à vontade, e assim a Mistura dos Raios na Imagem *pt* ser tão grande ou pequena quanto desejei.¹³⁰

A focalização da imagem proveniente do buraco F antes de seus raios serem refratados pelo prisma melhora a definição da imagem *pt*, tornando seus lados paralelos *gl* e *ae* mais distintos e a separação entre as cores do espectro mais perfeita. Newton também sugeriu o uso vantajoso de uma fenda retangular, com comprimento paralelo ao eixo do prisma.

PROPOSIÇÃO V

Luz Homogênea é refratada regularmente sem qualquer Dilatação, divisão ou espedaçamento dos Raios, e a Visão confusa dos Objetos vistos sob Luz heterogênea através de Corpos refratores surge da diferente Refrangibilidade dos vários tipos de Raios.

O objetivo dessa proposição foi o de demonstrar que as cores são propriedades inatas dos raios de luz e não modificações causadas pela refração. Na época, muitos filósofos (entre eles Hooke, Huygens e Pardies) adotavam a hipótese de que as cores eram resultado de modificações da luz branca causadas por sua passagem de um meio para outro¹³¹. Os Experimentos 12, 13 e 14 são propostos para provar essa proposição e são complementares à discussão feita no Experimento 5 sobre imutabilidade dos raios homogêneos de luz.

¹³⁰ *Opticks*, p. 68.

¹³¹ Veja a discussão sobre a Proposição II, Experimento 6.

Experimento 12.

Esse experimento é uma nova versão do Experimento 6, porém focalizando a luz com uma lente. Newton fez o espectro da luz solar do Experimento 11 incidir sobre um papel preto com um pequeno furo no meio. A luz (de uma única cor) que atravessou o furo foi refratada por um outro prisma e incidiu sobre um papel branco. Observou

(...) que o Espectro formado sobre o Papel por essa Luz não era oblongo, como na refração da Luz composta do Sol (no terceiro Experimento), mas era perfeitamente circular (tanto quanto pude julgar por meus Olhos), o Comprimento não sendo maior que a Largura. O que mostra que essa Luz é refratada regularmente sem qualquer Dilatação dos Raios.¹³²

A imagem observada seria "perfeitamente circular" se apenas um tipo de raio (luz monocromática, em linguagem moderna) fosse refratada pelo prisma e se o feixe incidisse perpendicularmente sobre o papel branco. Isso não ocorre pois o furo tem um tamanho que permite a passagem de mais de um tipo de raio. Se o furo usado for muito pequeno é possível obter uma imagem bem próxima da forma circular, mas não "perfeitamente circular".

O comentário "tanto quanto pude julgar pelos meus Olhos" indica que Newton estava ciente desse problema, mas não mediu esses efeitos, que são muito pequenos.

Experimento 13.

Newton observou dois círculos de papel branco através de um prisma colocado a uma distância de alguns pés. Um dos círculos foi iluminado por luz homogênea e o outro pela luz do Sol. Viu que

O Círculo iluminado pela Luz heterogênea do Sol apareceu muito alongado, como no quarto Experimento, o Comprimento sendo muitas vezes maior que a Largura; mas o outro Círculo, iluminado com Luz homogênea, apareceu circular e distintamente definido, como quando visto a Olho nu. O que prova a Proposição completa.¹³³

É necessário observar os círculos através dos prismas colocados a alguns metros de distância, pois se olharmos através do prisma colocado perto dos círculos, nenhuma diferença será observada pois os raios não divergem de uma quantidade suficiente para se notar o efeito.

Experimento 14.

Newton observou moscas e outros pequenos objetos iluminados por luz homogênea e por luz solar através de um prisma.

Quando as moscas foram iluminadas por luz homogênea suas menores partes

¹³² *Opticks*, p. 73.

¹³³ *Opticks*, p. 74.

apareceram "distintamente definidas" como se as observasse a olho nu. Mas quando foram iluminadas pela luz solar, suas partes pareciam confusas, não sendo possível distinguir as partes menores umas das outras.

Concluiu que, como não havia outras diferenças entre as duas situações, a causa dessa confusão estaria

(...) na Luz pela qual os Objetos eram iluminados e que em um Caso era simples e no outro composta; e portanto a Visão distinta no primeiro Caso e confusa no último somente poderia surgir da diferença das Luzes. O que prova a Proposição completa.¹³⁴

Após relatar esses três experimentos, Newton concluiu que

E além disso é muito notável nesses três Experimentos que a Cor de Luz homogênea nunca foi mudada pela Refração.¹³⁵

Ou seja, que a refração não altera as propriedades da luz homogênea. Note que o mesmo não foi provado para a luz solar.

PROPOSIÇÃO VI

O Seno da Incidência de cada Raio considerado separadamente está para seu Seno da Refração em uma Razão dada.

No *Opticks*, a lei da refração apareceu pela primeira vez sob a forma do Axioma 5. Nessa proposição Newton apresentou, para o caso de luz homogênea, uma prova experimental e uma demonstração geométrica da lei.

Para testar se cada tipo de raio considerado individualmente obedece à lei dos senos, Newton elaborou um experimento no qual a luz foi refratada por dois prismas perpendiculares. Como mostrou nos experimentos anteriores, os raios vermelhos são os menos refratados no primeiro e no segundo prisma e os raios azuis os mais refratados em ambos.

Embora antes já tivesse estabelecido quantitativamente a relação entre as refrangibilidades, agora Newton quer provar que, para ângulos de incidência iguais, os senos de refração de raios diferentes mantêm uma certa proporção entre si. Para demonstrar isso, ele se propõe provar que os senos de refração dos diversos raios mantêm uma proporção constante para o seno da refração de um raio de refrangibilidade intermediária (que ele considera verde).

¹³⁴ *Opticks*, p. 74-5.

¹³⁵ *Opticks*, p. 75.

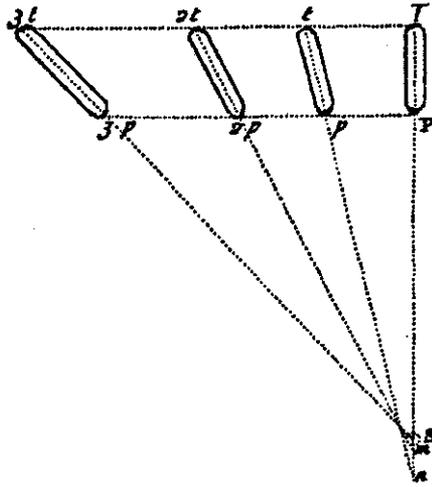


Fig. 1.26

A figura 1.26 representa a forma e posição das figuras obtidas após as duas refrações sucessivas da luz solar. A luz atravessou dois prismas colocados transversalmente, como no Experimento 5, Parte 1. O ponto S mostra a posição do feixe de luz solar caso incidisse diretamente na parede. O espectro PT é produzido pelo primeiro prisma. A imagem $3p3t$ é formada quando os dois prismas usados possuem o mesmo ângulo de refração. Nesse caso, Newton observou que o prolongamento do espectro $3p3t$ passa por S. Portanto, os triângulos $3tTS$ e $3pPS$ são semelhantes e a relação entre seus lados fornece uma relação entre as tangentes dos ângulos de deflexão.

Lohne discutiu esse experimento e afirmou que Newton idealizou os resultados ao afirmar que os espectros são retos. Segundo Lohne, os espectros são curvos e a curva $3t3p$ não intercepta o ponto S.¹³⁶

Newton não mostrou por esse experimento a validade da lei dos senos. Ele percebeu que a prova experimental da lei poderia ser obtida após a transformação das tangentes em senos:

Quando a Luz do Espectro PT cai perpendicularmente sobre a Parede, aquelas Linhas $3tT$, $3pP$ e $2tT$, $2pP$ e tT , pP são as tangentes das Refrações e, portanto, por esse Experimento, as Proporções das Tangentes das Refrações são obtidas, de onde as Proporções dos Senos sendo derivadas, são iguais, observando os Espectros e usando algum Raciocínio matemático.¹³⁷

No entanto, ele próprio não fez isso: "Pois eu não fiz um cálculo preciso". Na verdade, a relação entre as medidas diretas desse experimento e as grandezas que Newton queria estudar é muito indireta. As distâncias medidas na parede proporcionam as tangentes das deflexões dos raios pelo prisma na posição de desvio mínimo, que não possuem uma relação simples com os senos dos ângulos de refração em uma única deflexão pelo vidro. Pensamos que seria possível, mas bastante complicado, chegar à conclusão a que Newton se propunha utilizando esse experimento.

Embora Newton tenha descrito uma possível prova experimental da lei dos senos, não pareceu muito satisfeito com ela e quis demonstrar que a lei é "rigorosamente

¹³⁶ LOHNE 1961.

¹³⁷ *Opticks*, p. 79.

verdadeira". Em outras palavras, quis apresentar uma demonstração teórica de que a lei dos senos deve ser sempre válida mesmo quando variar a natureza do raio incidente.

Essa dedução é feita a partir da seguinte suposição:

Os corpos refratam a Luz agindo sobre seus Raios em Linhas perpendiculares à suas Superfícies.¹³⁸

Isto é, supôs a existência de uma força qualquer perpendicular à superfície refratora¹³⁹. Para estudar o movimento de cada raio separou-o em uma componente paralela à superfície e outra perpendicular. A força não altera a componente paralela da velocidade, somente a componente perpendicular é modificada pela atração ou repulsão em direção à normal da superfície. Em sua dedução, Newton utilizou a seguinte proposição auxiliar:

Se qualquer Movimento ou coisa móvel que incida com qualquer Velocidade em qualquer espaço estreito determinado pelos dois lados de dois Planos paralelos, e em sua Passagem através daquele espaço é desviado perpendicularmente em direção ao Plano mais distante por qualquer força que a uma dada distância do Plano é de Quantidades dadas; a velocidade perpendicular daquele Movimento ou Coisa, em sua emergência daquele espaço, deverá ser sempre igual à Raiz quadrada da soma do quadrado da velocidade perpendicular daquele Movimento ou Coisa em sua Incidência naquele espaço com o quadrado da velocidade perpendicular que aquele Movimento ou Coisa deveria ter em sua Emergência, se na Incidência sua velocidade perpendicular for muito pequena.¹⁴⁰

Newton não apresentou qualquer demonstração dessa proposição, nem tampouco um referência de onde poderia haver tal demonstração. Numa atitude sarcástica comenta:

A Demonstração será facilmente encontrada pelos Matemáticos e portanto não perturbarei o Leitor com ela.¹⁴¹

Mostramos uma possível tentativa de se reconstituir o raciocínio de Newton a partir dos elementos da época no Apêndice 4.

PROPOSIÇÃO VII

A Perfeição dos Telescópios é impedida pelas Refrangibilidades diferentes dos Raios de Luz.

A Proposição VII é uma aplicação da teoria newtoniana sobre luz e cores ao estudo de lentes e telescópios. Antes de Newton, a imperfeição dos telescópios era atribuída somente à aberração esférica:

¹³⁸ *Opticks*, p.79. Há semelhanças entre a demonstração de Newton e a de Descartes, que estão comentadas em SABRA, *Theories of light*, pp. 110-112 e pp. 300-307.

¹³⁹ Newton já havia apresentado uma demonstração da lei da refração, partindo da mesma suposição, nos *Principia* (Livro I, Seção XIV, Proposições 94-95).

¹⁴⁰ *Opticks*, pp. 79-80.

¹⁴¹ *Opticks*, p. 80.

A Imperfeição dos Telescópios é vulgarmente atribuída às Formas esféricas dos Vidros, e por isso os Matemáticos propuseram o uso de Secções cônicas para suas formas. Para provar que eles estão enganados, inseri essa Proposição; cuja prova aparecerá pelas medidas das Refrações de vários tipos de Raios (...).¹⁴²

A impossibilidade de se atingir a perfeição dos telescópios é explicada por Newton da seguinte maneira:

E se Raios de todos os tipos, vindos de qualquer Ponto brilhante no Eixo de qualquer Lente convexa, convergirem pela Refração das Lentes para Pontos não muito distantes da Lente, os Focos dos Raios mais refrangíveis deverão estar mais próximos da Lente que os Focos dos menos refrangíveis (...).¹⁴³

Depois de descrever detalhadamente um experimento no qual estudou a convergência de raios coloridos com uma lente, concluiu que

(...) é certo que Raios que diferem em Refrangibilidade não convergem para o mesmo Foco, mas se vierem de um Ponto brilhante, tão distante da Lente de um lado como seus Focos do outro, os Focos dos Raios mais refrangíveis deverão estar mais próximos da Lente que os dos [raios] menos refrangíveis (...).¹⁴⁴

O telescópio refletor

O estabelecimento dos refletores como única alternativa para a melhora dos telescópios não ocorreu facilmente. Em 1672, Newton já havia proposto os telescópios refletores com alternativa e encontrou resistências.

Em suas considerações sobre a teoria de Newton sobre luz e cores publicada em 1672, Hooke censura Newton por ter desistido de tentar a melhora dos telescópios refratores. Contra a desistência de Newton de melhorar as lentes, Hooke argumentou que a reflexão não é o único meio de melhorar os telescópios, pois o uso de espelhos causa um outro efeito indesejado: para Hooke, a aberração esférica provocaria um defeito na imagem maior que o provocado pela aberração cromática.¹⁴⁵

Na parte do *Principia* dedicada à óptica (Livro I, seção XIV), Newton deixa suas idéias mais claras sobre as aberrações existentes nos telescópios refratores:

Se as objetivas dos Telescópios fossem feitas de dois vidros de formato esférico contendo água entre elas, não é improvável que os erros que ocorrem nas *extremidades* das superfícies dos vidros sejam suficientemente corrigidos pela refração da água. Tais vidros objetivos são preferíveis aos

¹⁴² *Opticks*, p. 82.

¹⁴³ *Opticks*, p. 85. Newton discutiu a impossibilidade de construção de lentes acromáticas no Experimento 8 da Parte II do *Opticks*.

¹⁴⁴ *Opticks*, p. 94.

¹⁴⁵ Os espelhos com formato parabólico não causam aberração esférica, no entanto, a construção desse tipo de espelho é difícil.

vidros elípticos e aos hiperbólicos, não apenas porque eles podem ser fabricados mais facilmente e com mais perfeição mas porque os feixes de raios situados fora do eixo do vidro poderiam ser refratados mais perfeitamente por ele.

Neste trecho Newton está se referindo à possibilidade de superação da aberração esférica, que é um defeito de focalização inevitável em lentes com o formato esférico. Esse efeito ocorre devido a diferença entre os ângulos de incidência dos raios que atravessam a periferia da lente e dos raios que atravessam a região próxima ao eixo de simetria da lente que 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. A seguir, Newton deixou explícito sua idéia de impossibilidade de superação da aberração cromática:

Mas as diferentes refrangibilidades dos raios são o obstáculo real que impede a perfeição da óptica com figuras Esféricas ou de outras formas. A menos que os erros assim surgidos possam ser corrigidos, todo o trabalho realizado em corrigir os outros [erros] será desperdiçado.¹⁴⁶

Newton não aceitou que os efeitos da aberração cromática sejam menores que os da esférica. Para provar que suas tentativas de melhorar os telescópios através da reflexão realmente são corretas, calculou os desvios produzidos por uma superfície esférica refletora côncava e por uma refratora convexa. Mostrou para Hooke em uma tabela comparativa que os erros por reflexão são menores que os causados pela refração. Newton já sabia desses resultados antes mesmo de publicar seu artigo pois já havia feito esses cálculos nas *Optical lectures*.¹⁴⁷

Como Kuhn apontou¹⁴⁸, os cálculos de Newton estavam corretos, mas eram incompatíveis com as observações dos resultados obtidos pelo uso de lentes esféricas. Newton explicou corretamente a discrepância como devida à menor sensibilidade de nossos olhos para os raios vermelhos e azuis. No entanto, falhou ao não perceber que esse resultado, na prática, tornava o efeito da aberração cromática da mesma ordem que os efeitos da aberração esférica.

Huygens também discutiu o problema de focalização em telescópios refratores¹⁴⁹. Em 1672, Newton falou sobre a existência de um erro de um 1/50 do diâmetro da objetiva na focalização dos raios que são coletados pela objetiva e são desviados para o foco devido a diferente refrangibilidade intrínseca dos raios com cores diferentes.

Huygens fez uma experiência com uma objetiva de 12 pés com a qual focalizou uma imagem dentro de um quarto escuro e observou que a imagem formada era "muito distinta e muito definida para ser produzida por raios que podem se desviar 1/50 da abertura". Com esse experimento concluiu que "é certo que a experiência não concorda com o que Mr. Newton sustenta".

Sendo assim, (como creio ter-lhe dito antes) pode ser que a diferença de Refrangibilidade não segue sempre a mesma proporção nas maiores e

¹⁴⁶ *Principia*, p. 233.

¹⁴⁷ *Optical lectures*, pp. 575-593.

¹⁴⁸ *Papers and letters*, p. 41.

¹⁴⁹ HUYGENS 1673a, p. 137.

Inicialmente Newton nem considerou essa observação de Huygens. Simplesmente respondeu que Huygens deveria "tomar sua caneta e calcular os erros dos vidros e do espelho que coletam os raios a igual distância e assim verá que está muito errado"¹⁵¹ ao afirmar que as diferentes refrangibilidades dos raios podem não constituir uma desvantagem tão considerável dos telescópios refratores.

Na segunda versão de sua resposta a Huygens, Newton admitiu que o problema apresentado por ele existe e propôs solução que não é correta. Inicialmente diz que o erro na focalização dos raios de $1/50$ é exagerado e por isso propõe um novo erro de $1/100$ (novamente não disse de onde tirou esse valor e muito menos qual o critério usado para mudar de $1/50$ para $1/100$).

Para justificar a perfeição da imagem observada por Huygens e a conseqüente falta de concordância com seus cálculos, Newton argumentou que são poucos os raios que são afetados por tal desvio em relação aos que não sofrem pois os raios que passam pelo meio da lente são em maior quantidade que os que passam pelas extremidades:

Os raios que incidem na parte do meio do vidro são refratados com exatidão suficiente como também aqueles que incidem perto do *perímetro* e tem um grau de refrangibilidade *médio*¹⁵².

Logo

somente os raios que incidem perto do perímetro e são *mais* ou *menos* refrangíveis para causar uma confusão sensível na imagem.¹⁵³

Segundo Newton, os raios que passam pela borda da lente são minoria e o defeito da imagem causado por eles é insignificante pois os raios que incidem na parte central (a maioria dos raios) sofrem uma refração tal que são focalizados exatamente num ponto.

Além disso, os raios que incidem nas extremidades podem ser separados em dois tipos: os que sofrem uma refração intermediária (verde e amarelo) e são desviados exatamente para o foco e os que sofrem as refrações extremas (azul e vermelho), esses sim são os responsáveis pelo defeito da imagem, mas como são minoria o efeito é desprezível.

Defendemos que, embora esse argumento pareça correto à primeira vista, está muito errado. Para esse erro, tomemos uma lente esférica como exemplo. Vamos dividi-la em duas regiões: um disco com raio $R/2$ e um anel com raios $R/2$ e R , onde R é o raio da lente. Vemos que a área do anel é $3\pi R^2/4$ enquanto a do disco é $\pi R^2/4$. Portanto, a área da região periférica é três vezes maior do que a área da região central, e a quantidade de luz transmitida por essa região periférica é também três vezes maior do que a transmitida pela região central. De acordo com o próprio Newton, os raios que passam pela periferia da lente são mais refratados, sendo assim a imagem formada deveria ser borrada pois a quantidade de raios que afetada pelo erro de focalização de $1/100$ é o triplo da que é focalizada perfeitamente.

¹⁵⁰ HUYGENS 1673a, p. 137.

¹⁵¹ NEWTON 1673a, p. 141-42.

¹⁵² NEWTON 1673a, p. 146.

¹⁵³ NEWTON 1673a, p. 146.

OPTICKS, LIVRO I, PARTE II

Na Parte I do *Opticks*, Newton tratou das propriedades de cor e refrangibilidade dos raios de luz e da composição da luz solar. Na Parte II, tratou da imutabilidade da luz, das cores dos objetos e apresentou algumas aplicações de sua teoria.

PROPOSIÇÃO I

O Fenômeno das Cores na Luz refratada ou refletida não é causado por novas Modificações da Luz imprimidas variadamente, de acordo com as várias Terminações da Luz e Sombra.

Como discutido na Proposição II, para Hooke as cores surgem devido a modificações que o feixe de luz branca sofre ao atravessar um meio refrator obliquamente. A diferença entre luz e escuridão que há nas bordas do feixe refratado determina se a borda é vermelha ou azul; as outras cores são o resultado da mistura de azul e vermelho em diferentes proporções. Provavelmente Newton elaborou essa proposição para descartar a teoria modificada de Hooke.

Por volta de 1665, logo no início de seu trabalho com luz e cores, Newton considerava que as cores dos objetos percebidas pelos olhos eram resultado de modificações provocadas pelos objetos na luz incidente:

Portanto, vermelho, amarelo, etc. são feitos nos corpos que param os raios que se movem mais lentamente sem impedir o movimento dos mais rápidos; e azul, verde e púrpura, pela diminuição do movimento dos raios mais rápidos e não dos mais lentos.¹⁵⁴

Essa explicação para as cores dos objetos invoca a teoria de modificação da luz, pois o movimento dos raios é diminuído pelos corpos. Sendo assim, as cores são continuamente modificadas conforme os raios encontram meios diferentes.¹⁵⁵

Em seu ensaio *Of colours*, Newton abandonou a teoria de modificação da luz e em seu artigo de 1672 para a Royal Society não há qualquer sinal dela. Deve-se notar que em seu *Notebook*, Newton trabalhava com a noção de raios como sendo "glóbulos" que variam em tamanho e velocidade, indício claro de sua preferência pela teoria corpuscular.¹⁵⁶

Experimento 1.

Um feixe de luz solar entrou num quarto escuro através do pequeno furo F e foi refratado por um prisma ABC distante cerca de 20 pés da janela. Após ser refratado, o feixe incidiu no obstáculo escuro GI com um furo oblongo muito fino H. A distância entre o obstáculo GI e o prisma era pequena de modo que essa distância não era

¹⁵⁴ *Notebook*, p. 434.

¹⁵⁵ *Optical lectures*, p. 6.

¹⁵⁶ Veja *Notebook*, p. 251, SABRA, *Theories of light*, p. 247 e, para uma discussão mais detalhada sobre os primórdios da teoria newtoniana, veja WESTFALL 1962.

suficiente para que as cores do espectro fossem percebidas. A luz que atravessou a fenda H incidiu em um papel branco *pt*, a 3 ou 4 pés do buraco, e o tingiu com as cores do espectro (figura 2.1).

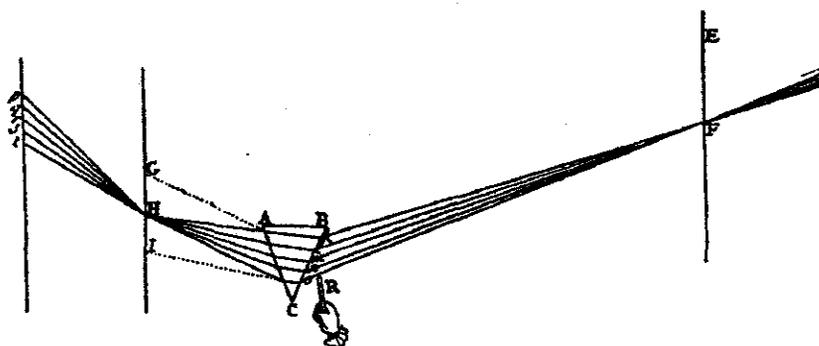


Fig. 2.1

Segundo Newton,

(...) interceptando os Raios em *k, l, m, n*, ou *o* com um corpo opaco bem fino, uma das Cores em *t, s, r, p* ou *q* desaparece, enquanto as outras Cores permanecem sobre o papel como antes (...)¹⁵⁷.

De acordo com a hipótese de Hooke na qual as cores são resultado de diferentes limitações de luz e sombra, o obstáculo R colocado na luz branca provocaria uma sombra que causaria o aparecimento de vermelho em uma de suas extremidades e de violeta em outra. No entanto, ao tentar esse experimento, Newton observou que

Todas as Cores foram indiferentes a qualquer Limitação de Sombras, e portanto as diferenças dessas Cores umas das outras não surge das diferentes Limitações de Sombras, pelas quais a Luz é variadamente modificada, como tem sido a Opinião dos Filósofos até agora.¹⁵⁸

Experimento 2.

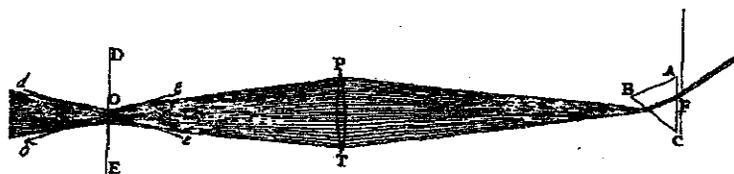


Fig. 2.2

Esse experimento também foi elaborado para mostrar que as cores não são resultado da limitação entre luz e sombra¹⁵⁹. Newton fez um feixe de luz branca entrar num quarto escuro pelo furo F e ser refratada por um prisma ABC colocado perto do furo e depois passar por uma lente convergente PT (figura 2.2). A lente convergiu os

¹⁵⁷ *Opticks*, p. 114.

¹⁵⁸ *Opticks*, p. 114.

¹⁵⁹ É bastante semelhante ao sugerido por Newton em 1672 para mostrar que a luz branca é uma mistura de raios. Veja NEWTON 1672a, pp. 57-58.

raios para o ponto O^{160} , onde Newton colocou um papel branco DE: Quando o papel estava perpendicular em relação à luz incidente, como representado pela posição DE, a luz no ponto O apareceu branca,

Mas sendo o Papel girado ao redor de um Eixo paralelo ao do Prisma, tornando-se muito inclinado em relação à Luz, como representado pela posições *de* e $\delta\epsilon$; a mesma Luz em um caso apareceu amarela e vermelha e no outro azul.¹⁶¹

Isso contraria a hipótese segundo a qual as cores são resultado da mistura de luz e sombra pois

Aqui uma mesma parte da Luz, em um mesmo lugar, de acordo com as várias Inclinações do Papel, apareceu em um caso branca, em outro amarela e vermelha, em um terceiro azul, enquanto a Limitação de Luz e sombra, e as Refrações do Prisma em todos esses casos permaneceram as mesmas.¹⁶²

Experimento 3.

Newton fez um feixe de luz solar entrar no quarto escuro através de um furo largo na janela, e colocou um obstáculo branco DE logo após o prisma ABC, como mostrado na figura 2.3. Após ser refratada por ABC, a luz incidiu em DE. Como o anteparo estava próximo do prisma, o feixe apresentou a cor branca, ao incidir perpendicularmente em DE;

(...) mas quando o Papel é muito inclinado de tal modo a se manter sempre paralelo ao Eixo do Prisma, a brancura de toda a Luz sobre o Papel mudará ou para amarelo e vermelho como na posição *de*, ou para o azul e violeta como na posição $\delta\epsilon$ conforme a inclinação do Papel seja desse ou daquele modo.¹⁶³

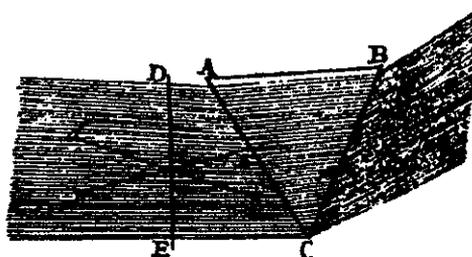


Fig. 2.3

Aqui há o mesmo problema que no experimento anterior: as cores surgem sem qualquer modificação causada por refrações e também sem a presença de sombras. Então

¹⁶⁰ Note que o ponto O não é o foco da lente PT, já que os raios incidentes não são paralelos ao eixo principal da lente.

¹⁶¹ *Opticks*, p. 116.

¹⁶² *Opticks*, pp. 116-17.

¹⁶³ *Opticks*, p. 118.

por que o papel aparece colorido em *de* e *de*? Newton respondeu:

O Papel na posição *de* estando mais oblíquo em relação aos Raios mais refrangíveis que aos menos refrangíveis, é iluminado mais fortemente pelos últimos que pelos primeiros e portanto os raios menos refrangíveis predominam na Luz refletida. E quando predominam em qualquer Luz, eles a tingem com vermelho e amarelo (...) ¹⁶⁴.

Quando o papel está na posição *de* ocorre o mesmo com os raios mais refrangíveis responsáveis pelo azul e violeta.

Experimento 4.

As cores das bolhas de sabão apresentam várias cores que mudam aparentemente sem qualquer relação com sombras ou limitações.

Se tal Bolha for protegida com um Vidro Côncavo, para mantê-la protegida de qualquer vento ou Movimento do Ar, as Cores irão lenta e regularmente mudar suas situações (...) e portanto suas Cores surgem de alguma Causa regular que não depende de qualquer Limitação de Sombras. ¹⁶⁵

As cores de bolhas e placas paralelas foram estudadas por Newton no Livro II do *Opticks*, mas não serão discutidas nessa dissertação. O ponto relevante aqui, é que essas cores não podiam ser explicadas como resultado de bordas e sombras.

Newton também citou o Experimento 10 da Parte I como prova dessa Proposição 2. Nesse experimento, como foi dito, a luz do Sol atravessou um paralelepípedo formado por dois prismas e, por reflexão na interface dos prismas, refletiu raios com cores diferentes. Segundo Newton, nesse caso "a Limitação da Sombra não pode ter nada a fazer na produção dessas Cores" e as cores também não podem ser causadas por modificações dos raios:

Essas Cores não podem surgir de quaisquer novas Modificações da Luz por Refrações, porque elas mudam sucessivamente do branco para o amarelo, laranja e vermelho, enquanto as Refrações permanecem as mesmas, e também porque ocorrem Refrações contrárias nas Superfícies paralelas, que destroem os Efeitos umas das outras. ¹⁶⁶

No entanto, esse experimento não exclui a possibilidade de que a primeira refração na face AB do prisma ABC possa ter causado uma modificação que se manteve inalterada pelas refrações seguintes, como dito na análise do Experimento 10 da Parte I.

PROPOSIÇÃO II

¹⁶⁴ *Opticks*, p. 119.

¹⁶⁵ *Opticks*, p. 119.

¹⁶⁶ *Opticks*, p. 120.

Toda Luz homogênea tem sua Cor própria correspondente a seu Grau de Refrangibilidade, e essa Cor não pode ser mudada por Reflexões e Refrações.

Até então, Newton não havia estabelecido uma relação formal entre cor e refrangibilidade dos raios de luz. Havia apenas observado que os raios vermelhos são os menos refratados e os violetas os mais refratados, mas isso não implica em uma relação entre essas duas propriedades.

Nessa proposição, Newton procurou mostrar que as cores dos raios homogêneos são propriedades imutáveis dos mesmos.

Experimento 5.

Newton refratou com um prisma uma pequena parte do espectro colorido da luz branca que atravessou um obstáculo negro com um pequeno furo, como no Experimento 12 da Parte I. Observou que

(...) por essa Refração a Cor da Luz nunca mudou nem um pouco. Se alguma Parte da Luz vermelha foi refratada, ela permaneceu totalmente da mesma Cor Vermelha como antes. Nenhum laranja, amarelo, verde, azul ou nenhuma outra nova Cor foi produzida por aquela Refração. Nem a Cor mudou em nada por Refrações repetidas, mas sempre continuou inteiramente o mesmo vermelho do começo. Também encontrei no azul, verde e outras Cores a mesma Constância e Imutabilidade.¹⁶⁷

Newton fez uma ressalva experimental bastante importante quanto à homogeneidade da luz refratada pelo segundo prisma, que é essencial para que não se observe nenhuma mudança no feixe após a refração:

Falo aqui de uma Mudança sensível da Cor: Pois a Luz que chamo aqui homogênea, não sendo absolutamente homogênea, deveria surgir alguma pequena Mudança da Cor de sua Heterogeneidade. Mas, se aquela Heterogeneidade fosse tão pequena como pode ser feita pelos ditos Experimentos da Proposição quarta, aquela Mudança não seria sensível e portanto nos Experimentos, onde o Sentido é Juiz, deveria ser considerada nula.¹⁶⁸

A importância desse experimento no *Opticks* é equivalente à do *experimentum crucis* do artigo de 1672, que também teve o papel de estabelecer a relação qualitativa entre cor e refrangibilidade.¹⁶⁹

Experimento 6

Newton testou se a imutabilidade das cores se mantinha após a reflexão da luz por corpos coloridos. Refletiu luz de cores diferentes por objetos feitos de materiais e cores

¹⁶⁷ *Opticks*, pp. 122-23.

¹⁶⁸ *Opticks*, p. 123.

¹⁶⁹ Uma discussão mais detalhada sobre esse tipo de experimento foi feita no Experimento 6 da Parte I.

diferentes, inclusive bolhas de sabão e penas de pavão. Viu que esses objetos

Na Luz homogênea de qualquer cor, apareceram totalmente daquela mesma Cor, apenas com essa Diferença: que alguns refletiram aquela Luz mais fortemente, outros mais fracamente. Nunca encontrei qualquer Corpo que refletindo Luz homogênea pudesse mudar sensivelmente suas Cores.¹⁷⁰

Um dos corpos testados por Newton foi uma tintura de *lignum nephriticum*¹⁷¹. Testou se ela provocava mudanças nas cores, encontrando que não. Atualmente sabe-se que esta substância é fluorescente¹⁷², portanto absorve a luz incidente e emite um tipo de 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.

No artigo de 1672, Newton já havia estabelecido a imutabilidade das cores após fazer vários experimentos tentando mudá-las sem nunca observar qualquer mudança. Na descrição desses experimentos, afirmou:

(...) refratei a luz com Prismas e refleti-a por Corpos que à luz do Dia eram de outras cores; interceptei-a com filmes coloridos de Ar entre duas placas de vidro comprimidas; transmiti através de Meios coloridos e através de Meios irradiados com outros tipos de Raios (...) e no entanto nunca produzi qualquer nova cor disso. Ela poderia por contração ou dilatação se tornar mais viva ou fraca e pela perda de muitos Raios em alguns casos muito obscura e escura; mas nunca pude vê-la mudar *in specie*.¹⁷³

Segundo Newton, a imutabilidade das cores por reflexão e refração é uma prova de que a luz solar é composta pela mistura de raios de todas as cores:

(...) se a Luz do Sol consistisse em um só tipo de Raios deveria haver apenas uma Cor em todo o mundo, nem seria possível produzir qualquer nova Cor por Reflexões e Refrações e, por consequência, a variedade de Cores depende da Composição da Luz.¹⁷⁴

Apesar de a argumentação de Newton parecer perfeita, ainda resta uma dúvida: nada prova que a reflexão da luz branca pelos objetos não produziu uma mudança nesta, nem que a luz colorida refletida por um objeto tenha exatamente as mesmas propriedades da luz espectral. Além disso, a luz refletida pelos objetos é composta, pois os objetos coloridos refletem mais que uma cor, porém mais intensamente a cor com a qual se apresentam quando iluminados por luz branca.

O próprio Newton reconheceu no *Optical lectures* que provou a imutabilidade das cores apenas após elas terem sido refratadas ao menos uma vez, e não para o caso da luz direta do sol:

¹⁷⁰ *Opticks*, p. 124.

¹⁷¹ Planta cujo nome científico é *Moringa pterygosperma* usada em infusão para o tratamento de pedras nos rins.

¹⁷² Lohne 196, p. 399.

¹⁷³ NEWTON 1672a, p. 54.

¹⁷⁴ *Opticks*, p. 124.

De fato, é o mais certo (...) que as disposições inerentes ou formas dos raios pelas quais eles são dispostos a exibir suas próprias cores não podem ser por qualquer modo mudadas nem destruídas pela força da segunda refração e a razão é a mesma para a primeira refração.¹⁷⁵

Sobre esse problema, Shapiro comentou

Para ser preciso, nessa época ele considerou um assunto simples estender a proposição para a primeira refração, mas como ele veio a reconhecer, é impossível admitir experimentalmente que as cores da luz do sol são imutáveis pela primeira refração. Pois se as cores de um feixe de luz solar forem comparadas antes e depois da refração, parece claro que elas mudaram pois antes da refração o feixe apareceu branco e depois apresentou todas as cores do espectro¹⁷⁶.

PROPOSIÇÃO III

Definir a Refrangibilidade dos vários tipos de Luz homogênea correspondendo às várias Cores.

Experimento 7.

Nesse experimento, Newton dividiu o espectro luminoso em sete faixas (figura 2.4), e determinou os índices de refração do vidro do prisma para as cores colocadas nos limites dessas faixas. Newton não se preocupou em medir as refrangibilidades para diferentes substâncias refratoras ou para diferentes ângulos de incidência.

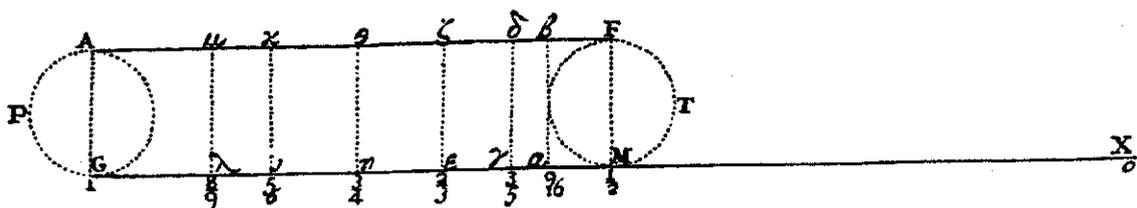


Fig. 2.4

Newton descreveu detalhadamente como elaborou a divisão do espectro, dando a impressão de ter realizado medidas de refração para as diferentes cores, mas não as mediu pois não usou luz homogênea. Ele simplesmente separou o espectro em faixas de cores determinadas arbitrariamente - daí as "sete cores" do espectro - de tal modo que a divisão concordou com a divisão da escala musical¹⁷⁷. Mediu o intervalo entre uma cor e outra no espectro de cores, como mostrado na figura 2.4. Para isso copiou num papel a

¹⁷⁵ *Optical lectures*, p. 505

¹⁷⁶ *Optical lectures*, p. 461-62.

¹⁷⁷ No *Opticks*, Newton descreveu o espectro de luz branca dividindo-o em sete cores distintas, divisão essa adotada até hoje. Mas no *Optical lectures*, ele inicialmente distinguiu cinco cores no espectro (vermelho, amarelo, verde, azul e violeta). Para uma discussão bastante detalhada dessa questão veja os artigos TOPPER, 1990.; SHAPIRO, 1979; e BIERSON, 1972.

forma FAPGMT do espectro, desenhou as linhas retas $\alpha\beta$, $\gamma\delta$, $\epsilon\zeta$, etc, que representam os finais de uma cor e começo de outra. Repetiu essa operação várias vezes e percebeu que

(...) as Observações concordaram bem o suficiente umas com as outras, e que os Lados Retilíneos MG e FA foram divididos pelas ditas linhas como na Escala Musical.¹⁷⁸

No *Optical lectures*, Newton também introduziu a analogia cor-som abruptamente sem dar maiores detalhes dos motivos que o levaram a isso:

(...) após essas cores terem sido espalhadas, fiz mais observações, e tudo apareceu como se as partes da imagem ocupadas por cada cor fossem proporcionais a uma corda dividida tal como os graus individuais das oitavas do som.¹⁷⁹

Até a publicação do *Opticks*, o *De sensu* de Aristóteles foi o referencial para especulações sobre a analogia entre a harmonia musical e as cores. Para Aristóteles, todas as cores derivam da mistura de branco e preto em várias proporções, com algumas cores resultando de razões simples, tais como 3:2 ou 3:4 e outras de razões incomensuráveis. No século XVII, as idéias sobre harmonia estavam presentes em todos os círculos filosóficos e conseqüentemente é difícil localizar uma fonte específica para as especulações de Newton. Em sua analogia, Newton eliminou os papéis do branco e do preto na formação das cores e tomou as cores como propriedades da luz refletida pelos corpos naturais.¹⁸⁰

Experimento 8.

No oitavo experimento, Newton procurou estabelecer a impossibilidade de separar as cores espectrais sem que houvesse um desvio do feixe: quando, após atravessar várias substâncias (como prismas de vidro e água) a direção final do feixe era igual à direção inicial, a luz do feixe era branca. Como conseqüência, se houvesse um desvio não nulo do feixe, haveria separação das cores. Isso tornaria impossível a produção de lentes compostas sem aberração cromática.

A afirmação de Newton sobre a impossibilidade de perfeição dos telescópios refratores se deve à sua certeza sobre a impossibilidade de se construir lentes acromáticas. Uma lente acromática é uma lente composta por combinação de materiais com dispersões diferentes:

(...) encontrei que se as superfícies refratoras forem paralelas ou inclinadas uma em relação à outra, quando Luz vai do Ar através de vários Meios refratores contíguos, como [por exemplo] Água e Vidro, e a seguir vai novamente para o Ar, conforme a Luz é corrigida por Refrações contrárias, emerge em linhas paralelas àquelas as quais era paralela antes [de incidir na superfície] e continua sendo branca sempre. Mas se os raios emergentes

¹⁷⁸ *Opticks*, p. 126.

¹⁷⁹ *Optical lectures*, p. 543.

¹⁸⁰ *Optical lectures*, p. 542, nota 20.

forem inclinados em relação aos incidentes, a brancura da Luz emergente passará a ser tingida em suas bordas com Cores. Isso eu tentei refratando Luz com Prismas de Vidro [colocados] dentro de Vasos prismáticos com Água.¹⁸¹

Em suas respostas às críticas de Hooke, Newton insistiu que a aberração cromática impunha uma limitação muito maior que a aberração esférica para a perfeição dos telescópios. Newton não descartava totalmente a possibilidade de construção de lentes acromáticas. Dizia que não lhe parecia impossível que refrações contrárias corrigissem umas às outras de tal modo que aberração cromática fosse eliminada. Para esse fim ele estudou os efeitos da combinação de vidros com diferentes fluidos entre eles. Mas não obteve resultados satisfatórios:

Embora refrações sucessivas que são todas feitas da mesma maneira necessariamente aumentam mais e mais os erros da primeira refração; contudo não parece impossível que por refrações *contrárias* cada desigualdade seja corrigida até tornar suas diferenças regulares e se isso pudesse ser convenientemente efetuado não haveria mais dificuldades. Para esse fim examinei o que poderia ser feito não apenas para *Vidros sozinhos*, mas mais especialmente por uma Complicação de sucessivos *Meios* diferentes, como por dois ou mais Vidros ou Cristais com Água ou algum outro fluido entre eles: os quais todos juntos podem fazer o papel de *uma Lente*, especialmente de *Objetivas*, de cuja construção a perfeição dos instrumentos depende. Mas quais os resultados em Teoria ou Tentativa obtidos, poderia encontrar possivelmente uma ocasião mais apropriada para declará-los.¹⁸²

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 Dolland¹⁸³.

O final dessa proposição é muito importante pois Newton nos diz como realmente procedeu: da teoria para o experimento. Através das proposições que introduziu na óptica, determinou

(...) matematicamente todos os tipos de Fenômenos de Cores que poderiam ser produzidos pelas Refrações. (...) Por essa maneira de questionar, inventei quase todos os Fenômenos descritos nesses Livros, além de alguns outros menos necessários ao Argumentos (...) ¹⁸⁴.

PROPOSIÇÃO IV

Podem ser produzidas por Composição cores que sejam semelhantes às Cores da Luz homogênea quanto à Aparência da Cor, mas não quanto à Imutabilidade da Cor e

¹⁸¹ *Opticks*, p. 129.

¹⁸² NEWTON 1672c, pp. 116-7.

¹⁸³ Sobre essa falha de Newton veja os artigos BECHLER, 1973 e SHAPIRO, 1979.

¹⁸⁴ *Opticks*, pp. 131-32.

Constituição da Luz. E quanto mais compostas sejam essas Cores tanto menos plenas e intensas elas serão, e por muita Composição elas podem ser diluídas e enfraquecidas até cessarem, e a Mistura se torna branca ou cinza. Pode haver também Cores produzidas por Composição que não são completamente semelhantes a qualquer Cor de Luz homogênea.

Newton introduziu nessa proposição uma diferenciação entre a sensação visual e as propriedades da luz. Nem sempre as cores que visualmente são iguais possuem as mesmas propriedades de refrangibilidade. Por exemplo,

(...) uma Mistura de vermelho e amarelo homogêneos compõe um Laranja, igual na aparência da Cor àquele laranja que na série das Cores prismáticas não misturadas está entre elas [vermelho e amarelo]; mas a Luz de um laranja é homogênea em relação a Refrangibilidade, e aquela outra é heterogênea, e a Cor de um, se vista através de um Prisma, permanece imutável e a do outro é mudada e resolvida em suas Cores componentes vermelho e amarelo.¹⁸⁵

Cores simples e compostas

Para entender o argumento de Newton é necessário entender melhor seu conceito de cor simples ou primária. De acordo com nossos sentidos as cores não são imutáveis, elas podem ser mudadas em várias circunstâncias. De fato, se as cores são entendidas como propriedades qualitativas da luz percebidas por nossos sentidos, elas podem ser transformadas, isto é, é possível produzir laranja a partir da mistura entre vermelho e amarelo. O verde pode se separar em azul e amarelo.

Em seu artigo de 1672, Newton introduziu uma diferenciação entre as propriedades da luz em si e a sensação causada pela luz em nossos sentidos. O mesmo tipo de luz sempre produz a mesma sensação, mas a mesma sensação pode ser causada por tipos diferentes de luz. Nesse artigo, Newton introduziu uma distinção entre cores espectrais puras e cores produzidas pela mistura de outras cores. Após estabelecer a imutabilidade das cores, Newton introduziu um novo conceito de cores simples e compostas:

Há dois tipos de cores. Uma é original e simples e a outra composta por elas. As cores originais ou primárias são vermelho, amarelo, verde, azul e violeta-púrpura, junto com laranja, índigo e uma variedade indefinida de graduações intermediárias.¹⁸⁶

As cores simples correspondem à luz homogênea, isto é, luz que não é decomposta em diferentes cores quando atravessa um prisma. As cores compostas correspondem a luz heterogênea e que podem ser decompostas em suas diferentes componentes. Newton enfatizou a impossibilidade de se distinguir visualmente entre as cores primárias e compostas:

As mesmas cores em *specie* que essas primárias também podem ser produzidas por composição: pois uma mistura de amarelo e azul faz verde,

¹⁸⁵ *Opticks*, pp. 132-33.

¹⁸⁶ NEWTON 1672a, p. 54

de vermelho e amarelo faz laranja (...).¹⁸⁷

Da mesma maneira que o vermelho e o amarelo, outras cores vizinhas no espectro podem ser misturadas e produzir uma cor intermediária. Como é o caso da mistura que resulta a cor verde:

Por sua vez, se o amarelo e azul forem iguais em quantidade eles desenharam o verde intermediário igualmente distantes deles mesmos em Composição, e assim mantêm-se como se estivessem em Equilíbrio, que ele não tende mais ao amarelo de um lado do que para o azul de outro, mas por sua Ação misturada permanece como uma Cor intermediária.¹⁸⁸

No artigo de 1672 Newton não introduziu um critério para diferenciar os dois tipos de cores. Seu conceito de cores simples e compostas está em termos de cores e não de refrangibilidade que, na realidade, é o que, para Newton, diferencia a natureza simples ou composta das cores. Somente em sua resposta para Hooke, Newton introduziu um critério experimental baseado na refrangibilidade para distinguir a natureza das cores. No entanto, como é de seu costume, Newton não reconhece que sua definição era inadequada e atribuiu a confusão à má interpretação de Hooke:

Mas porque suspeitei por algumas circunstâncias que a *Distinção* poderia não ser corretamente compreendida, eu a declararei mais uma vez e a seguir a explicarei por experimentos. Uma cor é primária ou original quando não pode por qualquer arte ser mudada e cujos raios são todos igualmente refrangíveis. E as compostas, que são mudadas em outras, e cujos raios não são igualmente refrangíveis.¹⁸⁹

Vemos que a distinção é feita experimentalmente em termos da refração sofrida pelos raios já que visualmente elas são indistinguíveis. A cor primária corresponde à luz homogênea que ao atravessar um prisma não se decompõe em outras cores. A cor composta é heterogênea e se decompõe nas suas cores componentes quando atravessa um prisma. O mesmo tipo de distinção foi usado por Newton no *Opticks* (definição VII do Livro I, Parte I).

Em nossa opinião, o problema da composição da luz pode ser resumido por uma aceitação de definição. Pode até parecer que Newton estava apenas brincando com palavras: se ele *define* cores simples e compostas desse modo, segue-se *da definição* que a luz branca não é simples, entrando dessa maneira num círculo vicioso onde a conclusão está implícita na hipótese. Portanto, todo o problema se reduziria a uma escolha de definição. Parece que Newton nem precisaria de muitos experimentos para atingir seu objetivo.

Isso é uma simplificação excessiva do problema. No entanto, talvez seja assim que a questão seja compreendida pela maioria dos estudantes e - infelizmente - por seus professores. Se a definição de Newton é aceita, então *apenas um só experimento* - a decomposição da luz branca por uma prisma - é suficiente para provar que a luz branca é composta.

¹⁸⁷ NEWTON 1672a, p. 54.

¹⁸⁸ *Opticks*, p. 133.

¹⁸⁹ NEWTON 1672c, p. 127.

As coisas não são bem assim, no entanto. Em primeiro lugar, deve-se notar que definições e distinções não são arbitrárias. Newton propôs uma dicotomia entre cores (e luz) primárias e compostas. Essa dicotomia é adequada sob o ponto de vista filosófico apenas se cada cor (ou luz) puder ser classificada exclusivamente *ou* como primária *ou* como composta, mas *nunca* como ambas ou nenhuma. Essa distinção será útil se nenhum dos dois conjuntos for vazio. Ora, somente pela experiência se pode determinar se essa distinção é adequada e útil.

O *experimentum crucis* permite mostrar que existem, realmente, cores puras: se separarmos do espectro colorido um feixe fino de luz, sua cor não será alterada por um segundo prisma. Além disso, é necessário também mostrar que essa cor não pode ser decomposta por outros meios (por exemplo: passando-a por um vidro colorido, ou refletindo-a por um papel colorido). Vários testes diferentes são necessário para estabelecer que o conceito de cor simples é consistente.

Além disso, é necessário testar se o conceito de cor composta resiste a alguns testes. Suponhamos que dois feixes puros de luz (por exemplo, vermelho e amarelo) são unidos, produzindo luz laranja. De acordo com o *conceito* de cor composta, esse laranja não pode ser puro ou simples. Mas apenas a *experiência* pode mostrar se essa luz laranja pode ser decomposta por um prisma. Poderia acontecer (em princípio) que a combinação de duas cores primárias diferentes pudesse, em alguns casos, proporcionar alguma outra cor diferente que não pudesse ser decomposta por um prisma¹⁹⁰. Por essa razão, Newton tinha que testar isso, também. E ele observou que as cores simples que foram empregadas para formar uma cor composta podiam ser recuperadas novamente passando a luz composta por um prisma.

As teorias dualísticas das cores

A visão de Newton sobre cores simples e compostas entrou em conflito com as idéias da época. Para Newton, existe uma infinidade de cores simples (as correspondentes aos raios homogêneos do espectro) e elas não se distinguem das compostas pelas suas propriedades visuais. Antes de Newton, costumava-se admitir a existência de um pequeno número de cores simples ou fundamentais (branco e preto, ou azul e amarelo, ou vermelho e azul, ou amarelo, azul e vermelho) e as outras cores seriam compostas por essas fundamentais.

Para sustentar sua hipótese dualística (discutida na Proposição II, Parte I), Hooke apresentou em suas Considerações ao artigo de Newton, um experimento discutido em sua *Micrographia*¹⁹¹ no qual produziu várias cores através da mistura de luz azul e vermelha com diferentes "diluições".

Hooke usou dois recipientes de vidro em forma de cunha, um com tintura vermelha de aloés e outro com tintura azul de sulfato de cobre. A primeira cunha exibiu vários tons de cores: do vermelho escuro, na parte mais espessa da cunha, até o amarelo, no canto mais fino. A cunha com tintura azul exibiu tonalidades de azul que variaram do

¹⁹⁰ Para compreender essa possibilidade, podemos comparar os fenômenos luminosos aos que ocorrem na química. Em alguns casos, quando juntamos duas substâncias puras é possível separá-las novamente por procedimentos físicos (decantação, destilação, etc.). Mas em outros casos, a união de duas substâncias puras produz uma terceira substância pura que não pode ser decomposta por procedimentos físicos. Poderia ocorrer, *em princípio*, que algo semelhante ocorresse com a luz. Em alguns casos poderíamos ter uma mera *mistura* de cores, em outros casos uma *combinação* de cores. Poderia também acontecer que a combinação de cores não pudesse ser decomposta por um prisma.

¹⁹¹ HOOKE, *Micrographia*, p. 73-75.

índigo até o azul pálido (figura vii). Sobrepondo as duas cunhas e olhando através de diversas espessuras do conjunto, Hooke observou que quando as cunhas deslizavam uma sobre a outra, o resultado era uma grande variedade de cores¹⁹².

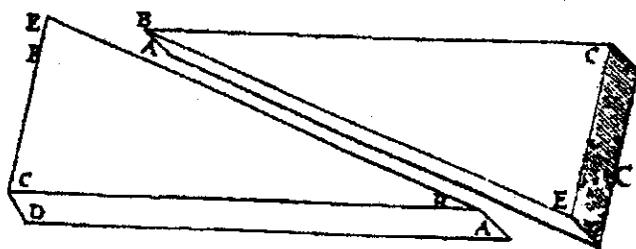


Fig. vii

Hooke argumentou que como o vermelho e o amarelo, bem como as várias tonalidades de azul, são produzidos pela mesma solução, de acordo com as diferentes espessuras do recipiente, eles devem ser graus da mesma cor, ou seja, a cor amarela é resultado da "diluição" do vermelho. Para responder a essa questão, Newton introduziu a teoria de absorção seletiva, na qual as soluções são qualificadas a absorver e transmitir as diferentes cores presentes na luz branca. A tintura de aloés transmite mais facilmente o vermelho e menos o violeta e com facilidades intermediárias as cores intermediárias. Assim, quando a camada de líquido é de pequena espessura ela não transmite os raios violetas, transmite principalmente raios amarelos. No entanto, essa explicação apresentada por Newton não invalida a explicação de Hooke, que usa a teoria dualística de cores.

Em suas Considerações, Hooke diz que todos os experimentos de Newton também podem ser explicados por sua própria teoria dualística de cores. No entanto, o fato de uma mesma cor poder ser obtida do espectro e também pela mistura de duas cores não pode ser explicado por Hooke, já que no primeiro caso a cor não pode ser separada em suas componentes pela refração e no segundo elas são separadas em suas componentes iniciais.

A existência de muitas cores primárias também gerou controvérsias. Como um mecanicista cartesiano, Huygens criticou principalmente a ausência de uma explicação mecânica para a diversidade de cores, já que Newton não explicou claramente em termos mecânicos em que consistem as cores e o que diferencia uma da outra. Essa atitude mecanicista de Huygens pode ser percebida claramente na carta criticando o artigo de Newton de 1672:

Penso que a Objeção mais importante é feita contra ele [Newton] através de uma *Questão*, isto é, Se há mais que dois tipos de Cores. De minha parte, acredito que para uma *Hipótese* poder explicar mecanicamente [as cores], as Cores *Amarelo* e *Azul*, por sua natureza, poderiam ser suficientes para todo o resto (...).¹⁹³

Como podemos perceber, Huygens concorda com Hooke que existem apenas duas cores primárias e que através delas é mais fácil explicar mecanicamente a diversidade de fenômenos relacionados com luz e cores. Novamente devido ao

¹⁹² Veja nota 37.

¹⁹³ HUYGENS 1673a, p. 136.

mecanicismo, Huygens preferiu explicar os fenômenos com apenas duas cores básicas:

(...) porque é muito mais fácil encontrar uma *Hipótese* pelo Movimento, que possa explicar essas duas diferenças [entre o amarelo e o azul] que para [explicar] muitas diversidades como são as outras Cores.¹⁹⁴

Nessa mesma carta, Huygens admitiu pela primeira vez a diferente refrangibilidade dos raios coloridos, sem, no entanto, deixar de classificar essa afirmação de Newton como uma hipótese:

E até que ele encontrou essa *Hipótese*, não nos ensinou em que consiste a natureza e diferença das Cores, mas apenas esse acidente (o que certamente é muito considerável) de suas *Refrangibilidades diferentes*.¹⁹⁵

PROPOSIÇÃO V

*Branco e todas as Cores cinzas entre o branco e o preto, podem ser compostas de Cores, e a brancura da Luz do Sol é composta de todas as Cores primárias misturadas em uma devida Proporção.*¹⁹⁶

Nessa proposição, a distinção mostrada nas palavras grifadas mostra que Newton admitiu a possibilidade da existência de dois tipos de branco: o branco da luz solar e outros brancos produzidos por misturas de outros tipos. Em 1672, havia descartado a possibilidade de haver mais que um tipo de luz branca:

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 devida¹⁹⁷. 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 sensivelmente¹⁹⁸ 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.¹⁹⁹

No *Opticks*, Newton apresentou seis experimentos para provar essa proposição:

¹⁹⁴ HUYGENS 1673a, p. 136.

¹⁹⁵ HUYGENS 1673a, p. 136.

¹⁹⁶ As palavras foram sublinhadas por nós.

¹⁹⁷ Não é verdade que sejam necessárias *todas* as cores do espectro para produzir o branco. Sobre isso veja a discussão mais abaixo.

¹⁹⁸ Esse "sensivelmente" é no sentido visual. Antes do *Opticks*, Newton apresentou 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: NEWTON 1672c.

¹⁹⁹ NEWTON 1672a, p. 55

Experimento 9

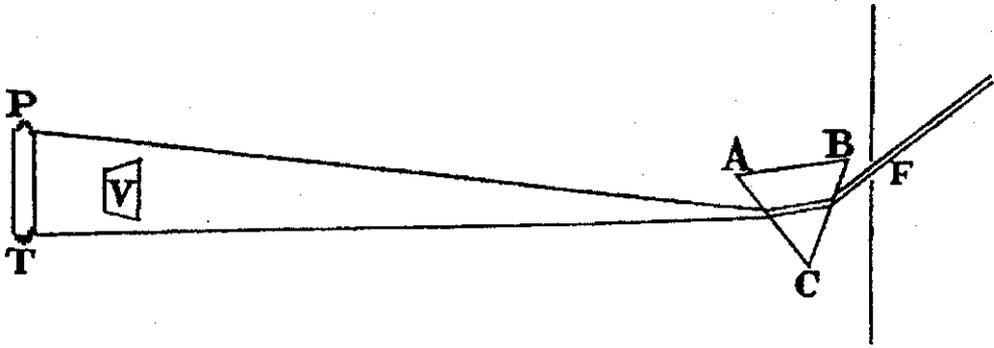


Fig. 2.5

Newton produziu um espectro PT sobre a parede por um feixe de luz que entrou no quarto escuro e foi refratado por um prisma. Manteve um papel branco V frente ao espectro, de tal modo que o papel pudesse ser iluminado pela luz colorida refletida pela parede, sem interceptar qualquer parte vinda do prisma em direção à parede, como mostrado na figura 2.5. Encontrou que

(...) quando o Papel era mantido mais próximo de qualquer Cor do que do restante, ele apareceu daquela Cor da qual mais se aproximou; mas quando ele estava igualmente ou quase igualmente distante de todas as Cores, de tal modo que podia ser igualmente iluminado por todas elas, apareceu branco.²⁰⁰

Mantendo o papel fixo na posição em que ele aparecia branco, interceptou algumas cores do espectro e viu que essa cor também desaparecia do papel e este perdia sua cor branca. Newton concluiu que "a confusão e mistura perfeita daquelas Cores compõe a brancura da Luz refletida".

Esse experimento mostra que a mistura das cores do espectro produz a sensação de branco mas não prova que a luz solar é composta pela mistura de cores pois a luz solar foi refratada pelo prisma, refletida pela parede e pelo papel branco antes de chegar aos olhos do observador. Como já foi dito na discussão do Experimento 6 da Parte I, nada garante que a refração não altera as propriedades da luz solar. O experimento não prova que a luz branca composta pela mistura de raios coloridos seja igual à luz solar.

Experimento 10

Nesse experimento, Newton concentrou a luz decomposta por um prisma, de modo a produzir luz branca. Esse experimento é igual ao sugerido por Newton em sua resposta às críticas de Hooke em 1672²⁰¹ com o objetivo de mostrar que quando os raios se cruzam, não destroem os efeitos ou propriedades adquiridas pela refração.

²⁰⁰ *Opticks*, p. 134.

²⁰¹ NEWTON 1672c, pp. 129-31.

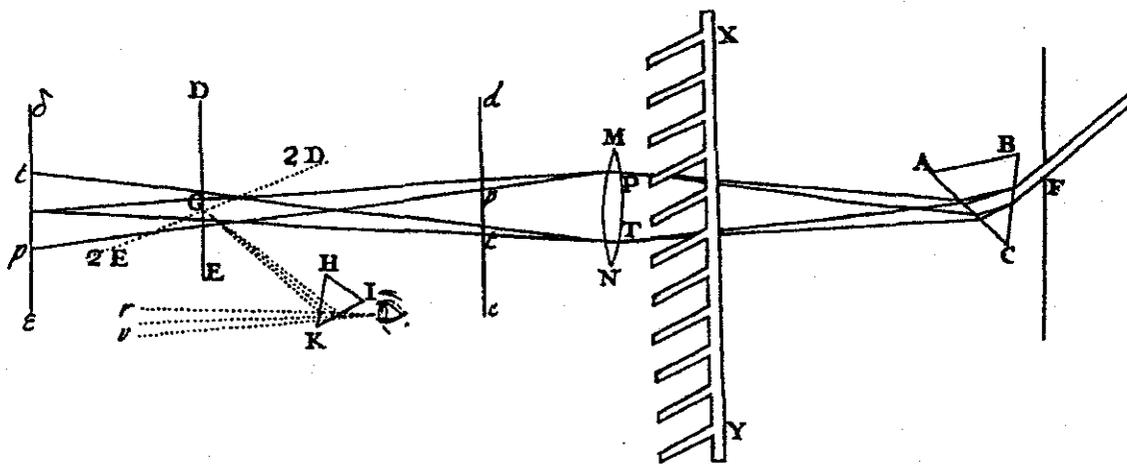


Fig. 2.6

Newton interpôs um pente XY entre o prisma e a lente convergente de tal modo que os dentes do pente interceptassem porções do espectro antes que os raios convergissem para o ponto G onde, na ausência do pente, observou a formação do branco (figura 2.6).

Se qualquer uma daquelas Cores for interceptada antes da Lente, a brancura cessará e se degenerará naquela Cor que surge da composição das outras Cores que não foram interceptadas. E então se as Cores interceptadas forem deixadas passar e caírem sobre aquela Cor composta, elas se misturam com ela, e por suas misturas restituem a brancura.²⁰²

Quando o papel branco foi colocado além do ponto G, o branco se desfez e Newton observou as cores do espectro sobre o papel. Interceptando uma das cores antes da lente, viu que ela também desaparecia no papel colocado em δe sem qualquer mudança das outras cores. Isso mostrava que, ao se unirem em G para formar luz branca, os diversos raios se mantinham separados, e não se transformavam.

Quando o papel estava no ponto G e a imagem era observada através de um outro prisma HIK, Newton viu que a imagem se trasladou para rv e apareceu tingida com as várias cores, sendo que na extremidade r apareceu o vermelho e na v o violeta. Interceptou os raios vermelhos antes da lente, vendo que eles também desapareceram quando a imagem formada em G foi olhada através do prisma HIK sem qualquer mudança nas outras cores do espectro.

Numa outra etapa do experimento, Newton colocou o papel no ponto G e fez

(...) todos os Dentes [do pente] passarem sucessivamente na frente da Lente e quando o Movimento era lento, apareceu um Sucessão permanente de Cores sobre o Papel: mas se acelerasse o Movimento tanto, que as Cores devido à sua Sucessão rápida não pudessem ser distinguidas umas das outras, a Aparência das Cores separadas desaparecia. Não havia mais vermelho, amarelo, verde, azul nem púrpura para serem vistos, mas de uma Confusão de todas elas surgiu uma Cor branca uniforme. Não há nenhuma Parte realmente branca na Luz que agora apareceu branca pela Mistura de todas as

²⁰² *Opticks*, p. 136.

Cores. Uma Parte era vermelha, outra amarela, uma terceira verde, uma quarta azul, uma quinta púrpura e cada Parte retém sua própria Cor até atingir o Sensorium.²⁰³

A luz causa impressões nos olhos que não podem ser distinguidas umas das outras quando ocorrem numa rápida sucessão e por isso causam a sensação de uma mistura homogênea:

Se as Impressões seguem uma a outra lentamente, tal que possam ser nitidamente percebidas, causam a Sensação de todas as Cores uma após a outra em uma sucessão contínua. Mas se as Impressões seguem uma a outra rapidamente, tal que não possam ser nitidamente percebidas, delas todas surge uma Sensação comum, que não é nem dessa ou daquela Cor sozinha, mas é indiferentemente de todas, e isso é a Sensação de Brancura.²⁰⁴

Em uma variação desses experimentos, ao invés da lente Newton usou dois prismas colocados em posições contrárias para convergir os raios, obtendo os mesmos resultados.

Experimento 11.

Newton observou através de um segundo prisma *abc* o espectro formado na parede por um prisma ABC (como no Experimento 3 da parte 1). A uma certa distância, a imagem redonda e branca do Sol apareceu na direção do espectro PT abaixo deste, como mostrado na figura 2.8. Aproximando-se da parede, Newton viu o espectro com as cores na ordem normal e afastando-se da parede as cores apareceram em ordem invertida. Usando um pente como do experimento anterior colocado entre a parede e o prisma *abc*, Newton observou o mesmo efeito do Experimento 10, concluindo que a luz branca é uma mistura de cores.

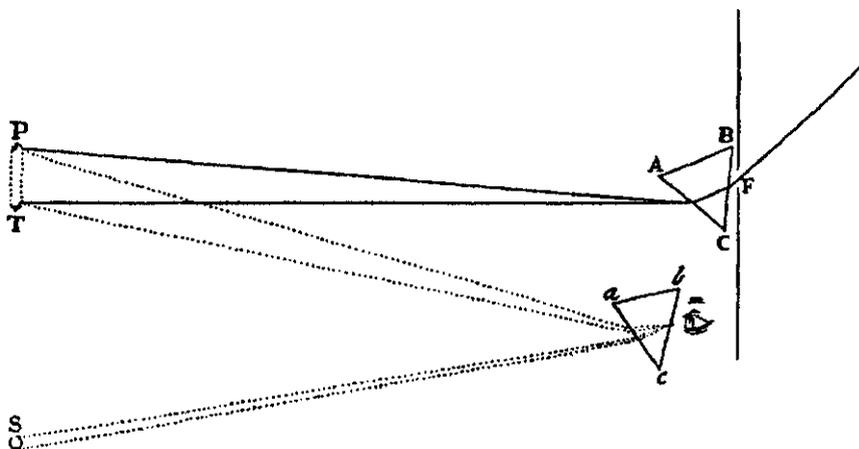


Fig. 2.8

Experimento 12.

²⁰³ *Opticks*, p. 147-8.

²⁰⁴ *Opticks*, p. 141.

A luz do Sol refratada por um grande prisma ABC foi interceptada por um pente XY colocado próximo ao prisma (em uma região em que o feixe refratado ainda parecia branco). Newton viu que sobre um papel DE colocado a cerca de 2 ou 3 polegadas do pente era formada uma série de faixas coloridas paralelas que representavam os espaços entre os dentes do pente pelos quais a luz refratada passou. Moveu o pente para cima e para baixo muito rapidamente e viu que as faixas coloridas se tornaram indistinguíveis e todo o papel DE apareceu branco (figura 2.9).

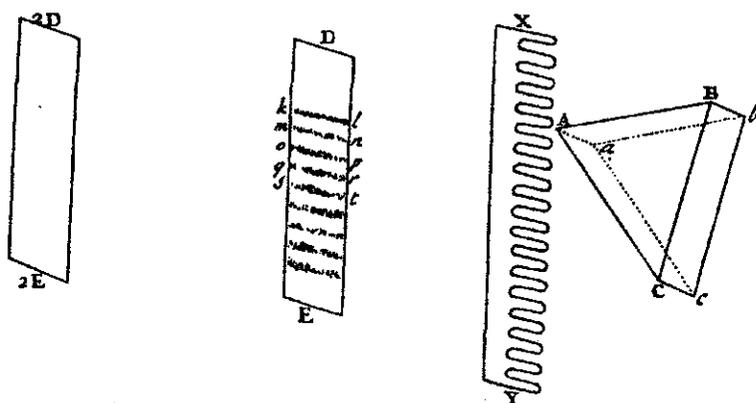


Fig. 2.9

Se o papel é colocado numa outra posição mais distante do pente, as faixas coloridas dilatam-se e se misturam umas com as outras, tornando o papel branco. Como o prisma ABC é grande, a distância necessária entre o prisma e o papel para que o espectro apareça distintamente é de vários pés. Newton não informou qual o tamanho do prisma, por isso não é possível saber precisamente qual essa distância.

Como no Experimento 3 da Parte II, Newton viu que inclinando o papel tal que os raios mais refratados vindos do prisma eram refletidos mais intensamente que os outros e a cor branca do papel mudou para azul e violeta. Inclinando em direção oposta, o papel tingiu-se de vermelho. Newton concluiu que

(...) a Cor branca de toda Luz refratada em sua primeira Emergência, onde ela aparece tão branca quanto antes da Incidência, é composta de várias Cores.²⁰⁵

Newton não afirmou aqui que a luz do Sol é composta, referiu-se à luz que sai do prisma e que, eventualmente, poderia ser diferente da luz solar.

Experimento 13.

²⁰⁵ Opticks, p. 147.

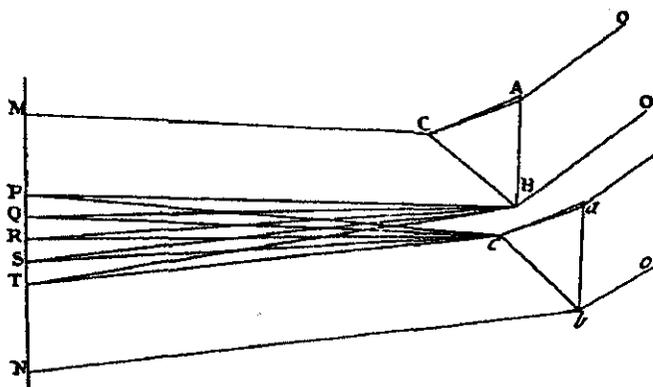


Fig. 2.10

Numa continuação do experimento anterior, Newton fez os feixes emergentes dos dois prismas iguais ABC e abc incidirem sobre um anteparo MN. Como MN estava próximo do prisma, não havia a formação do espectro completo, isto é, as cores não apareceram nitidamente. Newton viu apenas as cores azul e vermelha nas extremidades dos dois feixes.

Na região PT onde os espectros coincidiram houve a formação de luz branca. Quando partes dos espectros foram interceptadas por um pente, o branco deu lugar a uma luz colorida, mas quando Newton moveu os pentes rapidamente, a luz colorida tornou-se branca novamente.

Experimento 14.

Newton observou que quando se olha de longe para espuma de sabão, não se percebe as cores que são vistas quando as bolhas são olhadas de perto. As diversas cores produzidas pelas partes de cada bolha não são mais vistas separadamente à distância, mas unem-se e formam o branco. Não entrou em detalhes nesse experimento provavelmente porque reservou o Livro II do *Opticks* para discutir esse tipo de fenômeno.

Experimento 15.

Nesse experimento, Newton procurou produzir um branco misturando pós de cores diferentes. Em 1672, Newton já havia apresentado um experimento desse tipo. Em sua crítica, Pardies concordou com o que Newton disse sobre mistura de cores:

Sem dúvida a mesma variação que é vista na mistura de vários corpos de diferentes cores é também observada na mistura de diferentes raios de várias cores: e o próprio autor também bem observou como a cor verde surge dos corpos amarelos e azuis, bem como uma cor verde é produzida do raio azul e amarelo.²⁰⁶

Mas sobre o branco ser mistura de todas as cores, Pardies comentou que de acordo com a hipótese de Newton, esta cor deveria aparecer quando tintas de todas as cores fossem misturadas, mas

²⁰⁶ PARDIES 1672a, p. 89.

(...) como o vermelho, amarelo, azul, púrpura e todas as outras quando misturadas juntas produzem não o branco mas uma cor escura.²⁰⁷

As cores dos objetos

A objeção feita por Pardies em sua segunda carta está de acordo com o que é observado experimentalmente. Newton respondeu à essa objeção, usando sua explicação das cores dos objetos: os corpos aparecem coloridos pois refletem principalmente uma cor da luz incidente²⁰⁸.

Mas para mim, branco, preto e todas as cores sombrias intermediárias, as quais podem ser compostas da mistura de branco e preto não diferem em sua espécie mas apenas na quantidade de luz. E como na mistura de tintas coloridas, cada corpúsculo reflete somente sua própria cor, e por isso a maior parte da luz incidente é suprimida e retida; a luz refletida se tornará obscura como se misturada com o escuro, ela não exhibe uma brancura intensa, mas uma obscura cor cinzenta.²⁰⁹

Quando misturamos tintas de todas as cores obtemos uma cor marrom e não cinza como diz Newton. O que ele fala sobre a mistura de tintas não tem nada a ver com o que é observado na prática, embora teoricamente sua explicação esteja correta. Pardies criticou a teoria newtoniana baseado no que era observado experimentalmente e sob esse aspecto Newton não deu conta de explicar.

De acordo com Newton, um objeto aparece com uma determinada cor quando iluminado com luz branca pois reflete essa cor mais intensamente que as outras. Apesar de refletir especialmente uma cor, ele não a reflete tão bem quanto um objeto branco. Por exemplo, se um objeto vermelho e um branco forem iluminados com luz espectral vermelha, o objeto branco aparece mais brilhante que o vermelho.

Isso se aplica à mistura de pós coloridos de várias cores. Quando os pós são misturados a cor resultante é um cinza ou marrom e não o mesmo branco obtido pela mistura de luzes coloridas:

E portanto pela mistura de tais Pós, não esperamos um Branco forte e pleno, como o do Papel, mas um branco um pouco obscuro, tal como o que deveria surgir da Mistura de Luz e Escuridão, ou de branco e preto, isto é, um cinza, ou marrom escuro, ou marrom avermelhado, tais como são as Cores de unhas de Homens, de um Rato, de Cinzas, de Pedras comuns, de Argamassa, de Poeira e Sujeira nas Estradas, e cores semelhantes.²¹⁰

No final dessa proposição, Newton apresentou um experimento importante que torna o cinza *visualmente* igual ao branco: comparou uma mistura cinza de pós de várias cores iluminado pela luz solar com um papel branco da mesma área que estava à sombra. Observando ambos de uma grande distância, viu que ambos apresentaram a mesma cor

²⁰⁷ PARDIES 1672a, p. 89.

²⁰⁸ As explicações contidas nas Proposições IV e X complementam a discussão apresentada aqui.

²⁰⁹ NEWTON 1672b, p.91

²¹⁰ *Opticks*, p. 150-1.

branca.

Após essa série de experimentos, Newton concluiu que

Pelo que foi dito, também é evidente que a Brancura da Luz do Sol é composta por todas as Cores dos vários tipos de Raios nos quais a Luz consiste que, por suas várias Refrangibilidades, são separados umas das outras, tingem Papel ou qualquer outro corpo Branco onde incidem. Pois aquelas Cores (pela *Prop. II. Parte 2*) são imutáveis e quando aqueles raios como suas cores são misturados novamente, produzem a mesma Luz branca que antes.²¹¹

A composição da luz branca por duas cores

Huygens sugeriu um experimento para mostrar que apenas o azul e o amarelo são suficientes para se produzir o branco. Num quarto escuro, um feixe de luz branca é refratado por um prisma formando, assim, um espectro colorido. Eliminando-se as cores das extremidades do espectro, isto é, eliminando-se o vermelho e o violeta (Huygens diz "o Vermelho e o Púrpura") sobram apenas as cores intermediárias (amarelo, verde e azul) que ao incidirem num papel branco deveriam fazer com que ele apresente a cor branca. Huygens não tentou o experimento, mas conjectura que se esse experimento for bem sucedido,

(...) não se pode mais dizer que todas as Cores são necessárias para compor o Branco e é muito provável que todo o resto [das cores] nada mais é que graus de *Amarelo* e *Azul*, mais ou menos carregados.²¹²

Embora as outras cores não sejam graus de azul e amarelo, a conjectura de Huygens está parcialmente correta pois, de fato, é possível produzir branco a partir de azul e amarelo. Helmholtz mostrou em 1852 que a mistura de amarelo e azul espectrais é a única mistura entre apenas duas cores espectrais que resulta na cor branca, contrariando o esperado, pois da mistura de pigmentos azul e amarelo resulta a cor verde.²¹³

Helmholtz aceita a hipótese de Thomas Young de que todas as cores espectrais podem ser produzidas a partir da mistura de apenas três cores primárias em proporções diferentes - o vermelho, o verde e o azul-violeta. A mistura dessas três cores primárias produz o branco por um processo chamado síntese aditiva²¹⁴. Também é possível obter branco pela mistura de duas cores complementares compostas pelas três cores primárias:

(...) obtemos branco a partir do vermelho, verde e violeta, que podem ser combinados em três pares de cores complementares; a saber, vermelho simples e azul-esverdeado composto, verde simples e vermelho púrpura composto, violeta simples e amarelo opaco composto.²¹⁵

²¹¹ *Opticks*, pp. 153-4.

²¹² HUYGENS 1673a, p. 137

²¹³ Sobre essa discussão veja SHAPIRO 1980 e HELMHOLTZ 1852.

²¹⁴ Para maiores detalhes sobre mistura de luz e pigmentos coloridos, veja PEDROSA, *Da cor à cor inexistente*.

²¹⁵ HELMHOLTZ 1852, p. 528.

Segundo Helmholtz, a produção do branco pela mistura das três cores simples se dá de maneira bem particular: o comprimento total do espectro é dividido em três seções. A cor predominante na primeira delas é o vermelho, o verde predomina na do meio e o violeta na terceira. As cores das diferentes partes do espectro se combinam de tal modo que

Cores da primeira e da segunda seções se combinam em tons de amarelo, com transições vermelha, cor de carne, branco e verde; aquelas da segunda e terceira combinam-se em azul, com transições verde, branca e violeta; aquelas da primeira e terceira combinam-se em vermelho púrpura, com transições cor de carne, rosa e violeta. Com respeito à combinação das três cores simples, podemos concluir que branco só pode ser produzido quando raios das três diferentes seções do espectro são adequadamente unidos.²¹⁶

Em se tratando da mistura de pigmentos coloridos, as cores primárias são o vermelho, o amarelo e o azul. A mistura dessas três cores produz o cinza neutro por síntese subtrativa²¹⁷. A mistura de pigmentos coloridos resulta em cores bem diferentes das obtidas pela mistura de luz espectral. Como exemplo temos a proposta de Huygens: a mistura de amarelo e azul espectrais não produz verde - como ocorre na mistura de pigmentos - mas sim um branco levemente esverdeado.

Shapiro mostrou que após as discussões com Huygens "em uma concessão extraordinária Newton garantiu efetivamente a verdade de sua sugestão", isto é, Newton admite a possibilidade do branco poder ser composto pela mistura de azul e amarelo²¹⁸.

A primeira tática adotada por Newton para responder às críticas de Huygens foi afirmar que, em sua teoria, as cores usadas para se produzir o branco são cores não compostas:

Isso é tão claro que concebo que não pode haver mais escrúpulos especialmente para aqueles que sabem como examinar se uma cor é simples ou composta & de quais cores ela é composta: que tendo explicado em outro lugar não preciso repetir agora.²¹⁹

Notemos que elas são não compostas no sentido newtoniano do termo. Isso significa que dentro de sua teoria esse argumento faz sentido, mas não significa que seja o único verdadeiro e muito menos o único possível.

Newton também tenta rejeitar experimentalmente a possibilidade de se compor o branco através de apenas duas cores, mas como podemos ver pelo trecho abaixo seu argumento não é muito convincente:

Mas eu acredito que não possa ser encontrado um experimento daquele tipo, porque, como me lembro, tentei-o uma vez pela mistura gradual de sucessivas cores não compostas & apesar de que algumas eram mais pálidas & próximas do branco que outras, nenhuma podia ser *verdadeiramente*

²¹⁶ HELMHOLTZ 1852, p. 527

²¹⁷ PEDROSA, *Da cor à cor inexistente*, p. 18.

²¹⁸ SHAPIRO 1980, p.224. Veja também a discussão da Proposição IV da Parte II.

²¹⁹ HUYGENS 1673a, p. 145.

chamada de branco. Mas tendo sido feita essa tentativa alguns anos atrás, não me lembro bem das circunstâncias, & portanto recomendo-a para que outros a tentem novamente.²²⁰

Após as discussões com Huygens, Newton não afirmou mais que para se produzir luz branca através de luz colorida todas as cores devem necessariamente estar presentes em tal mistura. Além disso, Newton introduziu uma embaraçosa diferenciação entre o branco da luz solar e os outros tipos de luz branca, que pode ser vista no título desta proposição, contradizendo suas afirmações feitas em seu artigo de 1672 de que "Brancura (...) é *sempre* composta, e para sua composição é necessário *todas* as cores primárias ditas anteriormente":

Huygens insiste na discussão sobre a composição da luz branca²²¹ e obtém uma resposta de Newton que, como apontou Shapiro²²², compromete seriamente a universalidade da teoria newtoniana:

Acerca do assunto de Cores, quando eu disse que quando Monsieur N.²²³ mostrou como *Branco* poderia ser produzido por duas cores não compostas, eu lhe direi porque ele não pode concluir nada disso; meu propósito era que tal Branco (se é que há tal) teria diferentes propriedades do Branco ao qual me refiri quando descrevi minha teoria, isto é, do Branco da luz imediata do Sol, dos objetos ordinários de nossos sentidos e de todos os *Phenomena* brancos que caíram na minha observação até agora.²²⁴

Essa resposta de Newton compromete a universalidade de sua teoria pois ele admite que haveria um tipo de branco diferente do branco da luz solar. Há um comprometimento de Newton na afirmação que faz no *Opticks*:

Brancura e todas as Cores cinzas entre branco e preto *podem* ser compostas por Cores, e a brancura da Luz do Sol é composta por todas as Cores primárias misturadas em uma devida Proporção.²²⁵

Newton deixa passar a possibilidade de se produzir branco pela mistura de apenas duas cores pois não afirma categoricamente a necessidade de todas as cores como faz em relação ao branco solar, diz que apenas que um tipo de branco pode ser composto por uma mistura de cores sem dizer quais e quantas são essas cores.

PROPOSIÇÃO VI

Saber a Cor da Composição em uma mistura de Cores Primárias, sendo dadas a Quantidade e Qualidade de cada uma.

²²⁰ HUYGENS 1673a, p. 145.

²²¹ HUYGENS 1673b.

²²² SHAPIRO 1980, p. 227

²²³ Era costume se publicar as discussões e críticas anonimamente nas *Transactions*.

²²⁴ NEWTON 1673a, p. 137.

²²⁵ *Opticks*, p. 134; os grifos são meus.

Aqui, Newton apresentou uma regra prática para se conhecer o resultado da mistura de cores espectrais²²⁶. Não encontramos em nenhum de seus trabalhos anteriores algo semelhante a essa proposição. Dividiu um círculo em sete partes proporcionais à divisão da escala musical²²⁷ e atribuiu a cada parte uma cor, como mostrado na figura 2.11. Para achar a cor resultante de uma mistura de cores primárias, desenha-se no centro de gravidade de cada arco um pequeno círculo proporcional à intensidade (“número de raios”) daquela cor presente na mistura considerada.

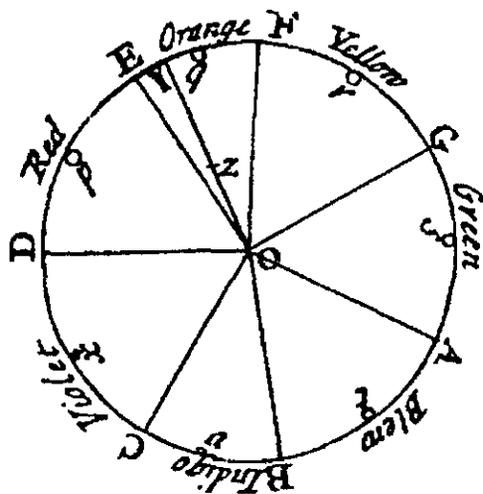


Fig. 2.11

Suponhamos que o centro de gravidade comum de todos os pequenos círculos é o ponto Z. Traça-se o raio OZ, que é prolongado até a circunferência, encontrando-a no ponto Y. Esse ponto representa a cor resultante da mistura e o segmento OZ é proporcional à intensidade da cor resultante comparada com a intensidade da cor pura Y. Se Z estiver sobre a circunferência, a intensidade da cor será máxima, se estiver sobre o centro da circunferência "a Cor deverá perder toda sua intensidade e tornar-se um branco".

Quando o centro de gravidade das sete cores misturadas em uma devida proporção, como a do espectro solar, cai sobre O, a cor resultante é o branco. No entanto, Newton adverte sobre a possibilidade de compor branco com a mistura de um número menor de cores:

(...) se apenas duas Cores primárias, as quais são opostas uma à outra no círculo, forem misturadas em uma proporção igual, o ponto Z cairá sobre o centro O, entretanto a Cor composta por essas duas não será perfeitamente branca, mas uma Cor anônima fraca. Pois eu nunca produzi um branco perfeito misturando apenas duas cores primárias, ainda. Eu não sei se ele [o branco] pode ser composto de uma mistura de três [cores] tomadas a distâncias iguais na circunferência, mas de quatro ou cinco eu não duvido. Mas essas são curiosidades de pouca ou nenhuma importância para a

²²⁶ Veja também as discussões das Proposições IV e V da Parte II.

²²⁷ A regra de proporcionalidade usada nessa divisão é $1/9, 1/16, 1/10, 1/9, 1/16, 1/16$ e $1/9$. Na Proposição III, a regra usada para a divisão musical do espectro era diferente: $1-8/9=1/9, 8/9-5/6=1/18, 5/6-3/4=1/12, 3/4-2/3=1/12, 2/3-3/5=1/15, 3/5-9/16=3/80, \text{ e } 9/16-1/2=1/16$. Newton não explicou essas escolhas.

compreensão dos fenômenos da Natureza. Pois em todos os brancos produzidos pela Natureza, costuma haver uma mistura de todos os tipos de Raios, e por conseqüência uma composição de todas Cores.²²⁸

Enquanto Newton excluiu explicitamente, mas não decisivamente, a possibilidade de composição de branco pela mistura de apenas duas cores, seu método implica que é possível compor o branco pela mistura de duas, três ou qualquer número de cores. Isso confirma a hipótese de que Newton fez uma concessão a Huygens.

PROPOSIÇÃO VII

Todas as Cores do Universo feitas pela Luz e que não dependem do Poder da Imaginação, ou são Cores de Luzes homogêneas ou compostas por elas concordando com a Regra do Problema anterior precisamente ou muito aproximadamente.

Newton resumiu nessa proposição toda sua argumentação feita por partes nas proposições anteriores. Provou em proposições anteriores que as cores que aparecem após a refração ou reflexão da luz não são causadas por modificações impostas pelo meio refrator sobre a luz e também não são devidas à mistura entre luz e escuridão (Proposição I, Parte II). Provou também que a cada tipo de raio de luz homogênea correspondem uma cor e uma refrangibilidade que são imutáveis por reflexões e outras refrações (Proposição II, Parte I e Proposição II, Parte II). Na Proposição V, Parte II, mostrou que a luz branca é uma mistura de todos os tipos de luz homogênea que não anulam suas propriedades individuais; o branco é uma sensação visual causada pelos vários raios que atingem os olhos simultaneamente.

Tomando essas proposições como partida, podemos resumir o raciocínio de Newton da seguinte forma: se a luz do Sol é uma mistura de vários tipos de raios, cada um dos quais tem suas várias refrangibilidades e cores que são propriedades imutáveis, então

(...) todas as Cores no Mundo devem surgir constantemente das qualidades coloríficas dos Raios dos quais as Luzes consistem e pelas quais aquelas Cores são vistas.²²⁹

PROPOSIÇÃO VIII

Explicar as Cores feitas pelos Prismas através das Propriedades descobertas da Luz.

²²⁸ *Opticks*, p. 156-57.

²²⁹ *Opticks*, p. 160.

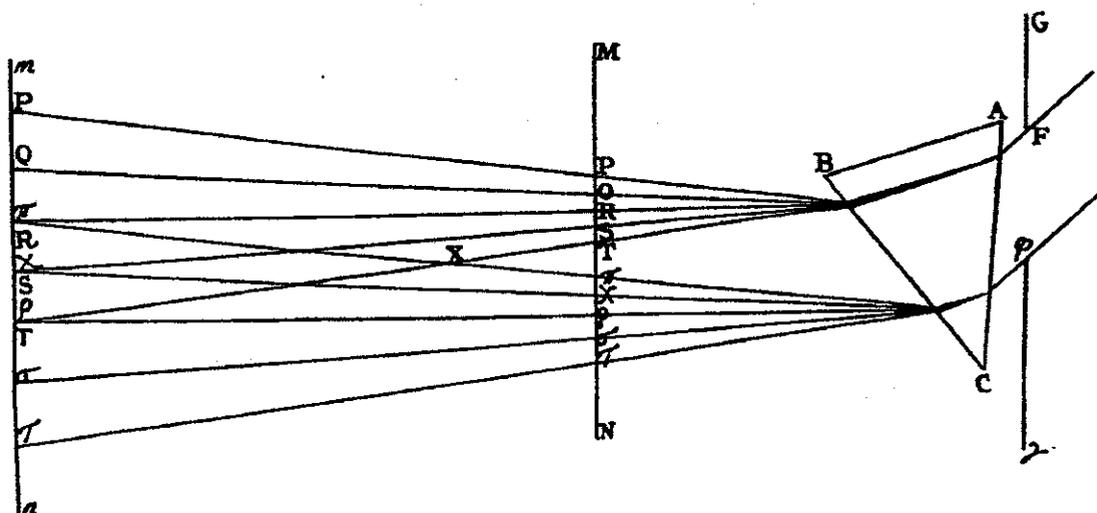


Fig. 2.12

Aqui, Newton explicou o mesmo experimento feito por Hooke, no qual descreve a formação de cores por um prisma. Como discutido na Proposição II, Parte I, para Hooke as cores são modificações dos raios de luz, sendo que as cores das bordas são devidas à sucessão de partes fortes e fracas no feixe de luz refratada impostas pelo meio refrator. Na sua explicação do experimento mostrado na figura 2.12, Newton contradisse a explicação de Hooke para o mesmo experimento.

Na figura 2.12, $F\phi$ representa um buraco de largura quase igual ao tamanho do prisma, MN um papel branco, $P\pi$ a região onde incidem os raios mais refrangíveis, $T\tau$ a região onde incidem os menos refrangíveis e nas outras regiões intermediárias incidem os raios misturados.

Quando o papel MN está próximo do prisma, a região intermediária $T\pi$ é iluminada por luz branca. Isso ocorre, segundo Newton, pois a região $T\pi$ é iluminada por todos os tipos de raios, provenientes de diversas partes do prisma, resultando em luz branca.

As outras regiões de PT e $\pi\tau$ não são iluminadas por todos os raios. A extremidade P aparece da cor violeta que vai se tornando menos intensa até que em S a cor observada seja um azul fraco que tende a verde. A outra extremidade τ apresenta a cor vermelha que se torna, pela mistura com os outros raios, um amarelo fraco tendendo mais para o verde que para o laranja, à medida que se aproxima de π . A região intermediária $T\pi$ é branca.

Quando Newton colocou o papel branco MN além do ponto X , os raios amarelos da região $\pi\tau$ se misturam com os azuis da região PT , produzindo a luz verde na região $T\pi$ que na situação anterior era branca. Assim, a teoria de Newton dava conta do progressivo aparecimento das cores, quando o papel era afastado do prisma de uma maneira muito diferente da teoria de Hooke.

Newton acrescentou que a aparência de um papel branco (contra fundo preto) visto através de um prisma pode ser explicado pelo mesmo princípio, e que no caso de um papel preto contra um fundo branco, as cores das bordas aparecem em ordem invertida²³⁰.

Até aqui, Newton se referiu à luz solar como sendo branca e composta pela

²³⁰ Para maiores detalhes veja a discussão da Proposição II da Parte I.

mistura de todas as cores do espectro. Fez um mudança importante nessa proposição no que se refere à luz branca:

Essas Cores deveriam aparecer se a Luz do Sol fosse perfeitamente branca; mas como ela tende ao amarelo, o excesso de raios produtores do amarelo pelos quais ela é tingida por essa cor, misturando-se com o azul fraco entre S e T, produzirá um verde fraco.²³¹

Um pouco mais adiante na mesma proposição, Newton também se refere à luz solar como sendo amarela:

Mas é observável no nono Experimento [da Parte I] que enquanto a Luz direta do Sol é amarela, o Excesso dos Raios produtores de azul no feixe de Luz refletida MN, é suficiente apenas para trazer aquele amarelo para um branco pálido tendendo para o azul, e não para tingi-lo com uma Cor azul intensa. Portanto para obter um azul melhor, usei a Luz das Nuvens ao invés da Luz amarela do Sol.²³²

Esses comentários passam quase despercebidos mas são importantes pois, segundo Newton disse anteriormente, a luz branca solar é composta por uma mistura proporcional de raios de todos os tipos. Mas agora ele está dizendo que a luz solar é amarela, contradizendo tudo o que afirmou antes.

Experimento 16.

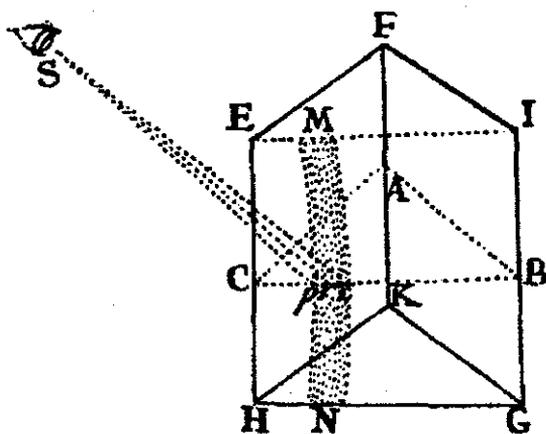


Fig. 2.13

Newton observou nesse experimento uma nuvem branca refletida internamente pela base de um prisma e explicou as cores da reflexão especular que ocorre na base do prisma, como nos Experimentos 9 e 10 da Parte I.

Quando o prisma estava ajustado numa posição conveniente, o observador S via o arco MN da cor azul. Esse arco apresenta uma pequena largura *pt* devido ao fato de ser composto por mais de um tipo de raio. A parte da base do prisma IMNG além do arco apareceu mais brilhante que a outra parte EMNH (figura 2.13).

²³¹ *Opticks*, p. 164.

²³² *Opticks*, p. 166.

Segundo Newton, isso ocorreu pois os raios menos refrangíveis que atingem a base do prisma entre os pontos t e B são totalmente refletidos para S; os raios que atingem a base entre t e C são parcialmente transmitidos através da base do prisma. Os raios mais refrangíveis que atingem a base do prisma entre os pontos p e B são totalmente refletidos para S, mas os que atingem o prisma entre p e C são parcialmente refratados e transmitidos através do prisma.

Do que segue que a Base do Prisma deve parecer branca e brilhante em todo lugar entre t e B por Reflexão total de todos os tipos de Raios para os Olhos. E todo lugar entre p e C [deve parecer] mais pálido, obscuro e escuro devido a Transmissão de muitos Raios de todo tipo. Mas em r , e em outros Lugares entre p e t , onde todos os Raios mais refrangíveis são refletidos para o Olho e muitos dos menos refrangíveis são transmitidos, o Excesso dos mais refrangíveis na Luz refletida tingirá aquela Luz com sua Cor que é violeta e azul.²³³

Quando se observa uma região mais clara e outra mais escura, a região intermediária terá que ser azul e violeta.

PROPOSIÇÃO IX

Explicar as Cores do Arco-íris pelas Propriedades descobertas da Luz.

Newton explicou a formação do arco-íris como sendo devida à refração da luz solar pelas gotas de chuva e descreveu o espalhamento da luz produzido por cada uma.

Pois o Sol brilhando sobre essas Gotas certamente faz o Arco aparecer para o Espectador colocado em uma devida Posição entre a Chuva e o Sol. Logo é aceito que esse Arco é formado pela Refração da Luz Solar nas gotas da Chuva caindo.²³⁴

Newton fez uma análise geométrica das refrações e reflexões de um raio de luz por uma gota esférica. Na figura 2.14, seja AN um raio de luz solar que incide sobre N e é refratado para F. Ao atingir F, o raio é parcialmente refratado para V e parcialmente refletido para G. Os raios que atingem G também são parcialmente refletidos para H e parcialmente refratados para R.

²³³ *Opticks*, p. 168.

²³⁴ *Opticks*, p. 169.

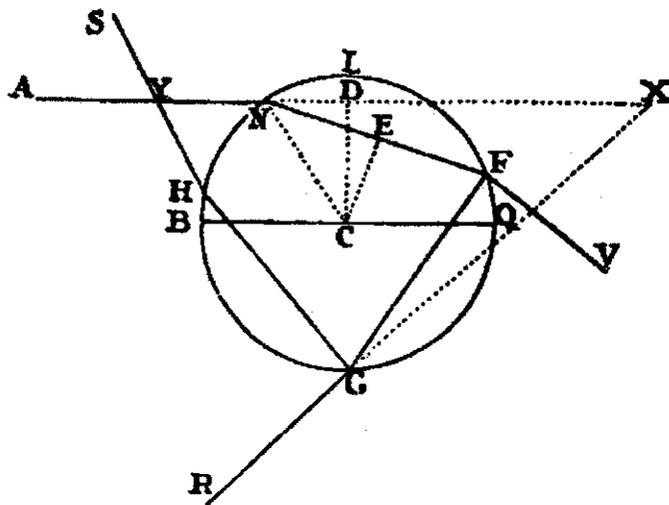


Fig. 2.14

Os raios que emergem da gota podem ser divididos em 3 tipos: os que sofrem uma reflexão interna e duas refrações (raios do tipo GR); os que sofrem duas reflexões internas e duas refrações (raios do tipo HS) e os demais raios.

Como a superfície da gota é supostamente esférica, todas as direções são equivalentes e há apenas uma variável importante que é a distância CD, que atualmente chamaríamos de parâmetro de impacto, isto é, a distância do raio incidente ao centro da gota. CD varia de zero, quando os raios incidem perpendicularmente sobre BQ até CL quando os raios são tangenciais à superfície da gota em L. Para cada tipo de raio os ângulos AXR e AYS variam em função de CD.

Os raios do tipo GR são considerados por Newton como mais importantes pois formam o arco primário EF mostrado na figura 2.15. EF é mais brilhante que o arco secundário HG formado pelos raios do tipo HS.

Quando a distância CD é zero, os raios do tipo GR são espalhados com um ângulo de 180 graus, isto é, eles são espalhados de volta em direção ao Sol. Conforme CD cresce, os raios se afastam do centro da gota e o ângulo de espalhamento diminui²³⁵:

(...) aumentando a distância CD, esses Ângulos [AXR e AYS] tendem para seus Limites, variam suas quantidades muito pouco num mesmo tempo e, portanto, um número muito maior de Raios que incidem sobre todos os pontos N no Quadrante BL deverá emergir nos Limites desses Ângulos, que em quaisquer outras Inclinações.²³⁶

Sendo assim, é esperado que a concentração de luz espalhada seja maior quando os ângulos de espalhamento variam mais lentamente com as mudanças em CD. Em outras palavras, a luz espalhada é mais brilhante onde há uma concentração de raios incidentes em vários pontos N. Essas regiões de mínima variação dos ângulos de espalhamento são as regiões onde os arcos primários e secundários ocorrem.

²³⁵ A demonstração geométrica da relação entre CD e o ângulo de espalhamento pode ser encontrada no *Optical lectures* p. 401.

²³⁶ *Opticks*, p. 171. Essa explicação é semelhante à de Descartes.

As reflexões diminuem a intensidade pois parte da luz é transmitida através da superfície da gota para fora.

As explicações de Descartes e Newton dão conta de várias características do arco-íris: explicam a existência dos arcos primários e secundários, a diferença de brilho entre os arcos e a posição angular da luz espalhada. No entanto, a óptica geométrica usada por eles não é capaz de explicar a existência dos outros arcos menos intensos observados. Para se entender esses outros arcos é necessário o uso da teoria ondulatória pois eles são devidos aos fenômenos de interferência, difração e polarização da luz.²³⁹

PROPOSIÇÃO X

Explicar as Cores permanentes dos Corpos Naturais pelas Propriedades descobertas da Luz.

Experimento 17.

Newton observou objetos de várias cores sob luz homogênea e viu que

Se você colocar Corpos de várias Cores nas Luzes homogêneas, encontrará, como encontrei, que cada Corpo aparece mais esplêndido e luminoso na Luz de sua própria Cor.²⁴⁰

Como exemplo, suponha um objeto vermelho. Ele será visto vermelho à luz do dia, pois reflete²⁴¹ a luz vermelha melhor que as outras cores. No entanto, além do vermelho, todas as outras cores também são refletidas em diferentes proporções. Se o objeto vermelho for iluminado com luz espectral violeta ele refletirá uma pequena parte dessa luz sem transformá-la em vermelho ou em qualquer outra cor. Portanto o objeto apresentará a cor violeta ao ser iluminado com luz violeta. Sendo assim, qualquer objeto pode aparecer com qualquer cor, desde que iluminado com a luz adequada²⁴².

Em seu artigo de 1672, Newton descreveu um experimento semelhante usando pigmentos azul e vermelho. Quando os pigmentos eram iluminados com as diferentes cores do espectro, Newton observou que eles apareciam das mesmas cores com as quais eram iluminados, embora aparecessem mais brilhantes quando iluminados com as próprias cores. A primeira observação feita por Newton desse experimento está em seus manuscritos:

Pintando um pedaço de papel com boas cores vermelha e azul, nenhuma delas mais luminosa que a outra. (...) se o azul prismático atinge as cores ambas aparecem perfeitamente azuis mas a tinta vermelha apresenta-se muito mais fraca e escura que o azul; se o vermelho prismático atingiu as cores ambas apareceram perfeitamente vermelhas mas o azul pintado apresentou-se

²³⁹ Para maiores detalhes veja o artigo NUSSENZVEIG, 1977.

²⁴⁰ *Opticks*, p. 179.

²⁴¹ Na realidade a luz é *difundida* pelo objeto e não *refletida*. No caso da reflexão os raios de luz obedecem às leis da reflexão - ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão. Usaremos o termo *reflexão* para manter a terminologia usada por Newton.

²⁴² Veja a discussão da seção "A cor dos objetos".

muito mais fraco que o vermelho.²⁴³

De acordo com a teoria de Newton as cores dos corpos coloridos não são modificações da luz recebida. Os corpos agem como filtros refletindo algumas cores e absorvendo outras. Newton explicou em 1672 que as cores dos objetos

(...) não têm outra origem senão esta, que eles são diversamente qualificados para refletir alguns tipos de luz em maior plenitude que outros. (...) isso significa que qualquer corpo pode aparecer de qualquer cor. Eles não têm cor apropriada, sempre aparecem da cor da luz que os atinge, mas com essa diferença, que eles são mais brilhantes e vívidos na luz de suas cores à luz do dia.²⁴⁴

Prosseguindo a exposição sobre as cores dos objetos, Newton discutiu o experimento no qual uma cunha de vidro transparente foi preenchida com líquido vermelho²⁴⁵. Observou a cunha contra a luz, e quando olhou através de sua parte mais fina viu que a luz transmitida até seus olhos era amarela e que, conforme deslocava a observação para a extremidade mais larga, a luz tendia para o vermelho escuro, passando por várias tonalidades de amarelo, laranja e vermelho.

Newton explicou suas observações através de um conceito de absorção seletiva da luz:

E se a espessura do Líquido é suficiente apenas para parar um número significativo de Raios que produzem o violeta e o índigo, sem diminuir muito o resto [dos raios], o resto deve compor um amarelo pálido (pela *Prop. 6, Parte 2*). Mas se o Líquido é tão espesso que pode parar também um grande número de Raios produtores de azul, e alguns dos produtores de verde, o resto deve compor um laranja (...) ²⁴⁶

e assim até que somente os raios que produzem o vermelho consigam passar pelo recipiente.

Como já foi visto, Newton consegue explicar o experimento de Hooke das duas cunhas que quando colocados juntas se tornavam opacas. Newton explicou dizendo que cada cor transmite apenas a sua própria e dessa maneira quando juntos os vasos se tornam opacos.

Pardies ²⁴⁷ questiona essa explicação dizendo que ela deveria valer para qualquer conjunto de duas cores mas isso "está longe da verdade." Esse era um questionamento adequado pois, de acordo com a explicação dada anteriormente por Newton, deveríamos observar a opacidade para qualquer conjunto de cores combinadas.

Em sua resposta, Newton inicialmente diz que quando misturamos dois líquidos eles agem entre si e adquirem uma nova textura que os torna opacos, não permitindo atingir os resultados desejados. Esse comentário não está de acordo com o experimento realizado pois no experimento os líquidos eram mantidos em vasos separados colocados

²⁴³ Notebook, p. 469.

²⁴⁴ NEWTON 1672a, p. 56.

²⁴⁵ Veja a discussão da Proposição IV da Parte II.

²⁴⁶ Opticks, p. 182. Newton usa essa linguagem para deixar claro que as cores estão nas pessoas e não na luz: a luz produz a sensação visual.

²⁴⁷ PARDIES 1672a, p. 89.

um na frente do outro.

A seguir Newton diz que os líquidos usados devem ser de

(...) cores intensas que transmitam poucos raios além de seus próprios, o que raramente ocorre, [esse fato] pode ser visto iluminando-se os líquidos com diferentes cores prismáticas em um quarto escuro.²⁴⁸

Na nossa opinião, esse comentário é procedente pois se usarmos um líquido que transmite mais que uma cor, a luz proveniente do primeiro vaso será composta e ao passar pelo segundo pode não ser totalmente extinta. Por exemplo, o primeiro vaso com um líquido vermelho impuro transmite luz vermelho e azul, o segundo vaso, que contém líquido azul, transmitirá luz azul, não ocorrendo a opacidade desejada.

Além desse problema, Newton diz que para que ocorra o fenômeno desejado

(...) é necessário que as cores empregadas sejam opostas, como o são vermelho e azul, ou amarelo e violeta, ou verde e aquele púrpura que se aproxima do escarlate.²⁴⁹

Esse ponto Newton não respondeu adequadamente. Supondo líquidos que obedecem as condições antes estabelecidas, o primeiro vaso deixará passar apenas sua própria cor e o segundo também, como os líquidos são de cores diferentes não deveríamos observar luz alguma, independentemente das cores dos líquidos serem opostas ou não.

PROPOSIÇÃO XI

Compor um feixe de Luz da mesma Cor e Natureza que um feixe direto de Luz do Sol pela mistura de Luzes coloridas e assim testar a Verdade da Proposições anteriores.

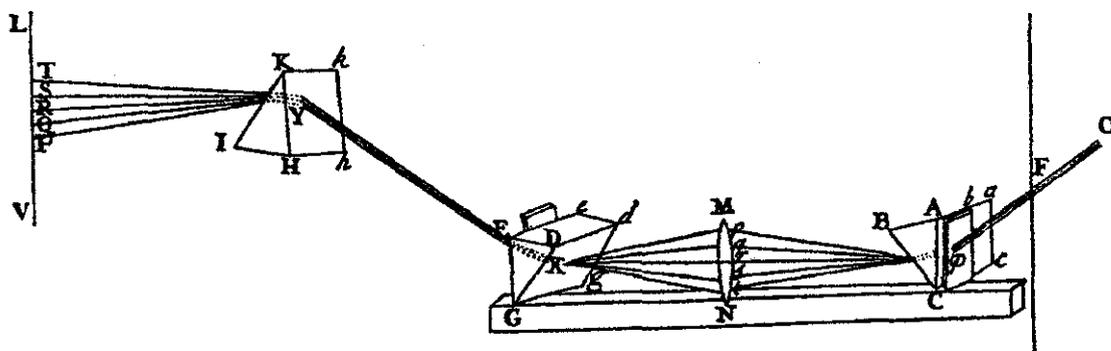


Fig. 2.16

O experimento apresentado nessa proposição é semelhante aos apresentados para provar a Proposição V²⁵⁰. Newton refratou um feixe de luz solar por um prisma ABC, a

²⁴⁸ NEWTON 1672b, p. 91.

²⁴⁹ NEWTON 1672b, pp. 91-2.

²⁵⁰ Esse experimento também está no *Optical lectures* p. 520.

seguir fez os raios coloridos emergentes convergirem para X pela lente MN. Depois disso, fez os raios serem novamente refratados por um outro prisma DEG igual ao primeiro e colocado à mesma distância da lente. Ajustando adequadamente os prismas e a lente, o feixe resultante XY era branco. O feixe XY foi novamente refratado por um terceiro prisma IHK e incidiu no anteparo LV onde formou o espectro colorido TP igual ao formado quando a luz solar atravessou um único prisma.

O feixe XY apresentou a cor branca pois é o resultado da refração contrária à do primeiro prisma. Segundo Newton, o feixe XY é "perfeitamente branco como um feixe de Luz Solar". Além disso,

Esse feixe de Luz composto tem a mesma aparência e é dotado de todas as mesmas Propriedades de um feixe direto de Luz Solar, até onde minhas Observações atingem.²⁵¹

Newton realizou alguns experimentos com o feixe XY iguais aos Experimentos 1 e 17 da parte 2 e obteve os mesmos resultados. Mas, por maior que seja o número de experimentos feitos, tudo o que pode ser afirmado é que os experimentos realizados deram o mesmo resultado com a luz solar e com o feixe branco recomposto XY, mas não se pode afirmar que eles sejam da mesma natureza.

Por comparação, pode-se formar um feixe luminoso composto por dois feixes polarizados com planos de polarização ortogonais; o feixe composto se comportará como um feixe não polarizado, mas ambos possuem constituições diferentes.

Newton já havia se deparado com esse problema em suas discussões com Hooke: a escolha entre a teoria newtoniana e a teoria modificada não pode ser feita apenas através de experimentos, pois em todos os experimentos de Newton a luz é refratada ao menos uma vez. Pode-se pensar que o meio produz mudanças no feixe que permanecem inalterados nas refrações subsequentes. De fato é impossível saber se as cores estão presentes na luz branca ou não antes dela ser refratada ao menos uma vez. É possível se sustentar que antes da primeira refração a luz branca é homogênea. Newton percebeu que a escolha entre as duas hipóteses deveria ser feita com base em argumentos metodológicos. Em sua resposta para Hooke, disse:

Eu não vejo razão para suspeitar que os mesmos *Phenomena* possam ter outras causas ao ar livre,²⁵²

isto é, ele não vê razão para introduzir a distinção entre os dois tipos de luz já que eles exibem as mesmas propriedades em todos os experimentos. Não se deve multiplicar as entidades sem necessidade: deve-se escolher a teoria mais simples. Esta é a regra metodológica conhecida como *Navalha de Occam*.

Para poder completar o seu raciocínio no *Opticks*, Newton deveria utilizar esse princípio epistemológico de simplicidade, como fez nas "Regras de filosofar" do Livro III dos *Principia*²⁵³. Na primeira edição de seu livro encontramos duas delas: "Regra 1: Não admitimos mais causas das coisas naturais que as que são verdadeiras e suficientes para explicar suas aparências. Regra 2: Portanto para os mesmos efeitos naturais

²⁵¹ *Opticks*, p. 188.

²⁵² NEWTON 1672c, p. 134.

²⁵³ Veja KOYRÉ, COHEN, & WHITMAN, *Isaac Newton's Philosophiae naturalis principia mathematica*, vol. 2, pp. 550-6.

devemos, sempre que possível, assumir as mesmas causas". Podemos perceber claramente o uso implícito desse tipo de argumento metodológico na teoria das cores de Newton. De fato: se a luz branca solar tem todas as propriedades iguais à da luz branca reconstituída a partir do espectro solar, podemos admitir que ambas são iguais, até prova em contrário, por simplicidade. Note-se que esse é um argumento *epistemológico*: nenhum experimento permite provar que ambos os tipos de luz branca são iguais.

CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi feita a análise detalhada da estrutura, proposições e experimentos do Livro I do *Opticks*, publicado em 1704 - quase 40 anos após o início das pesquisas de Newton sobre óptica. Esse estudo foi feito à luz de seus escritos mais antigos sobre óptica, onde já existem vários aspectos de sua teoria sobre luz e cores.

Newton defende, em sua teoria, a existência de uma infinidade de tipos diferentes de cores, cada uma delas sendo simples ou pura e cada uma delas dotada de uma refrangibilidade diferente (para uma determinada substância refringente). Cada uma dessas cores puras é imutável, não podendo ser decomposta por um prisma nem alterada por reflexão, composição com outras cores ou outros processos. Quando duas cores diferentes são compostas para formar uma nova cor, elas não alteram suas propriedades e podem ser separadas novamente, através de um prisma. A luz branca, ao invés de ser simples, como se acreditava, é composta por uma mistura de todas as cores do espectro, em uma proporção definida. Além de defender sua teoria, Newton ataca (em geral, indiretamente) outras teorias existentes na época, especialmente a de Hooke.

O método utilizado no *Opticks* se baseia principalmente em experimentos. Após cada proposição de sua teoria, Newton apresenta "A Prova por Experimentos" [*The Proof by Experiments*]. O uso constante e coerente dessa expressão certamente reflete a crença de Newton de que sua teoria das cores se fundamentava nos experimentos (indução) e que qualquer pessoa que repetisse corretamente seus experimentos teria que chegar às mesmas conclusões que ele próprio. Ao longo da obra, há um enorme número de experimentos que vão se reforçando e produzindo uma forte base para sua teoria.

A grande variedade de experimentos inventados por Newton mostra o amadurecimento dos argumentos necessários para justificar a teoria e refletem a influência das críticas recebidas após a publicação de seu artigo em 1672 nas *Philosophical Transactions*, onde apresentou sua teoria sobre luz e cores. Grande parte desses experimentos foi inventada com o objetivo de evitar a possibilidade de críticas semelhantes àquelas.

O método experimental utilizado por Newton no *Opticks* foi considerado exemplar por vários filósofos da ciência. Ernst Mach, por exemplo, assim se refere a essa obra:

Não é recomendável considerar um único experimento ou observação sozinho como provando a correção de uma opinião que parece ser confirmada por ele. Ao invés disso, deve-se sempre que possível variar as condições, tanto as consideradas importantes quanto as que parecem indiferentes; e isso tanto com seus próprios experimentos quanto com os dos outros. Newton em seu *Opticks* fez um uso extenso e exemplar deste método, assim estabelecendo os fundamentos para a física experimental moderna, assim como seu *Principia* o torna o fundador da física matemática. (MACH, *Knowledge and error*, pp. 89-90)

Em muitos casos, no entanto, como a análise desta dissertação mostrou, há pontos frágeis nos experimentos e na argumentação de Newton.

A Proposição II é a mais importante do Livro I. Ela afirma que os raios do Sol são uma mistura heterogênea de raios de diferentes refrangibilidades. Para provar tal proposição, Newton apresentou uma série de experimentos que analisam a luz refratada e refletida em diversas situações.

O raciocínio elaborado por Newton para provar que a luz é uma mistura de raios pode ser resumido da seguinte maneira.

1. Estudou a relação entre cor e refrangibilidade e estabeleceu que a cada cor corresponde um grau de refrangibilidade. Essa propriedade se aplica apenas às cores puras ou primárias - aquelas que não podem ser decompostas por prismas. Esse novo conceito introduzido por Newton foi central em sua argumentação.

2. Por uma série de experimentos, mostrou que a luz colorida pura é imutável. Como as cores são imutáveis e estão relacionadas com a refrangibilidade, esta última também é imutável.

3. Como a refrangibilidade dos raios de luz não composta é imutável, elas devem ser iguais antes da refração, isto é, o prisma não modifica essa característica dos raios. Portanto os raios coloridos já estão presentes na luz branca antes dela atravessar o prisma.

O Experimento 3 da Parte I já havia sido apresentado por Newton em 1672. Naquela ocasião, ele não havia explicado claramente que a posição de desvio mínimo do prisma era essencial para justificar que a forma alongada do espectro observado não estava de acordo com as leis da refração aceitas.

A forma esperada para o espectro formado quando os raios provenientes do disco solar atravessam um prisma posicionado em uma posição qualquer é alongada. Devido ao diâmetro do disco solar, os raios incidem no prisma com ângulos diferentes e por isso são desviados de ângulos diferentes, formando uma imagem alongada. Quando o prisma está ajustado na posição de desvio mínimo, no entanto, a diferença entre os ângulos de incidência dos raios vindos das extremidades do disco solar não é significativa. Nessa situação, o esperado seria um espectro circular.

A posição de desvio mínimo não era de conhecimento geral na época, tanto que as críticas feitas por Pardies tocaram nesse ponto. Para Pardies, o espectro solar observado era alongado devido ao diâmetro finito do Sol. Newton eliminou esse problema no *Opticks* explicitando que o prisma estava posicionado em tal posição, mas não apresentou a demonstração dessas propriedades.

O estudo do Experimento 3 indica que a forma do espectro descrita por Newton no *Opticks* - laterais retilíneas e finais semicirculares - é uma idealização feita a partir do esperado teoricamente, e não de observações diretas. É muito improvável que Newton tenha realmente observado a forma que descreveu, pois o espectro consiste em uma região central iluminada e uma região de penumbra na qual as cores diminuem até alcançarem o preto. Os olhos distinguem o vermelho mais facilmente que o azul e violeta da região de penumbra, além disso o olho humano é mais sensível para a região amarela do espectro. Por isso, provavelmente Newton viu uma figura com forma de gota, com a parte mais fina tingida de azul e violeta e a parte mais larga de amarelo que é a cor mais intensa do espectro solar. É impossível saber com precisão a forma do espectro observada por Newton, pois a sensibilidade do olho para comprimentos de onda próximos ao azul varia de pessoa para pessoa e a intensidade relativa do azul no espectro depende das condições atmosféricas.

Newton modificou o papel do Experimento 6 em relação ao atribuído a ele anteriormente. Em 1672, esse experimento foi batizado de *experimentum crucis*, e foi usado para decidir se o efeito observado no Experimento 3 era devido a alguma modificação causada pelo prisma no feixe, ou se era devido a alguma propriedade dos raios de luz. Concluiu que a luz branca é uma mistura de raios com refrangibilidades diferentes.

Ao responder a seus críticos, Newton atribuiu papéis diferentes ao *experimentum*

crucis. Em sua resposta a Hooke, atribuiu a esse experimento o papel de mostrar que raios de cores diferentes não são modificados ao serem refratados, numa clara alusão à teoria do próprio Hooke. Para Hooke a luz branca é um tipo de vibração não periódica e a luz colorida corresponde a modificações que o prisma imprime na luz branca. No *Opticks*, Newton amenizou a importância desse experimento em relação ao de 1672, não atribuiu a ele um papel decisivo: é mais um experimento entre os outros.

Em 1672, Newton introduziu uma distinção entre cores espectrais puras (cores simples) e cores produzidas pela mistura de outras cores (cores compostas). As cores simples correspondem à luz homogênea, isto é, não são decompostas em diferentes cores quando atravessam um prisma. As cores compostas correspondem à luz heterogênea e podem ser decompostas em suas diferentes componentes após atravessarem um prisma. A diferenciação entre as propriedades da luz em si e a sensação causada pela luz em nossos sentidos é necessária pois o mesmo tipo de luz sempre produz a mesma sensação, mas a mesma sensação pode ser causada por tipos diferentes de luz.

Naquele artigo, no entanto, Newton não introduziu um critério para diferenciar os dois tipos de cores. Seu conceito de cores simples e compostas havia sido formulado em termos de cores e não de refrangibilidade que, na realidade, é o que, para Newton, diferencia a natureza simples ou composta das cores. Somente em sua resposta para Hooke, Newton introduziu um critério experimental baseado na refrangibilidade para distinguir a natureza das cores que foi mantido no *Opticks*.

O problema da composição da luz pode ser resumido por uma aceitação de definição: a partir da definição de Newton para cores simples e compostas, segue-se pelo experimento com um prisma que a luz branca é composta.

Em 1672, Newton descartou enfaticamente a possibilidade de haver mais que um tipo de luz branca. No entanto, no *Opticks*, admitiu a possibilidade da existência de dois tipos de branco: o branco da luz solar e outros brancos produzidos por misturas de outros tipos. O motivo dessa mudança pode ser atribuído à influência das discussões com Huygens. Segundo Huygens, é possível produzir branco pela mistura de luz espectral amarela e azul. Atualmente sabemos que é possível produzir luz branca pela mistura de duas cores complementares compostas pelas três cores primárias (vermelho, verde e violeta). O único par de cores complementares não compostas que produz luz branca é o amarelo e o azul. Após as discussões com Huygens, Newton deixou de afirmar que para se produzir luz branca através da mistura de luz colorida todas as cores devem necessariamente estar presentes em tal mistura. Além disso, Newton introduziu uma embaraçosa diferenciação entre o branco da luz solar e os outros tipos de luz branca. Essa diferenciação compromete a universalidade de sua teoria pois Newton admitiu que haveria um tipo de branco diferente do branco da luz solar.

Através da variedade de circunstâncias, Newton procurou reforçar a idéia de a luz ser uma mistura de raios com propriedades diferentes. Há, no entanto, um ponto que sempre pode ser questionado: por que motivo se deveria aceitar que os raios coloridos, que diferem em refrangibilidades *já existiam* na luz branca e não foram *produzidos* no experimento?

Esse mesmo tipo de questionamento foi feito por vários contemporâneos de Newton, entre eles Hooke e Pardies. A escolha entre a teoria newtoniana e a teoria de modificação não pode ser feita apenas através dos experimentos, pois em todos os experimentos de Newton a luz é refratada ao menos uma vez. Pode-se pensar que o meio produz mudanças no feixe que permanecem inalterados nas refrações subsequentes.

De fato é impossível saber se as cores estão presentes ou não na luz branca antes dela ser refratada ao menos uma vez. É possível se sustentar que antes da primeira

refração a luz branca é homogênea.

Newton percebeu que a escolha entre as duas hipóteses deveria ser feita baseada em argumentos metodológicos. Em sua resposta para Hooke, disse não ver razão para introduzir a distinção entre os dois tipos de luz já que eles exibem as mesmas propriedades em todos os experimentos. Não se deve multiplicar as entidades sem necessidade: deve-se escolher a teoria mais simples. Esta é a regra metodológica conhecida como *Navalha de Occam*.

O estudo crítico do trabalho de Newton nos mostra que sua teoria de luz e cores não foi construída por pura "indução" dos experimentos. Newton precisou lançar mão de argumentos metodológicos para estabelecer certos pontos conflitantes de sua teoria.

A teoria newtoniana de luz e cores apresenta muitos pontos problemáticos que geralmente não são discutidos. Essa ausência de discussão pode gerar uma visão distorcida da dinâmica científica, já que transmite a idéia de que apenas os experimentos são necessários para se fundamentar uma nova teoria.

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 believed;) but Original and Connate properties, which in divers rays are divers: Where several Observations and Experiments are alledged 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, secundùm principia Renati Des-Cartes; novâ methodo adornata & explicata. III. An Essay to the Advancement of MUSICK; by Thomas Salmon M. A. Advertisement about Thæzon Smyrnæus. An Index for the Transactions 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,
T O 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 applyed my self to the grinding of Optick glasses of other figures than Spherical,) I procur'd me a Triangular glass-Prisme, to try therewith the celebrated Phenomena of
G o o o Colours.

¹ Esta tradução foi aceita para publicação pela Revista de Ensino da Sociedade Brasileira de Ensino de Física. A versão a ser publicada contém notas explicativas extras.

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*⁸.

Comparando o comprimento deste *Espectro* [*Spectrum*]⁹ 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 proceder¹⁰. 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 improcedente 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 poderiam ser dilatadas assim¹¹. 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 $2 \frac{1}{8}$; o diâmetro do buraco $\frac{1}{4}$ de polegada; os raios que se dirigiam ao meio da imagem

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. Veja as discussões sobre a Proposição II, parte I da dissertação.

⁸ A 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. e as discussões sobre a Proposição II, Parte I.

⁹ Em 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).

¹⁰ Neste 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 (*Notebook*) indicam que suas primeiras idéias sobre relação entre cores e diferença de refrangibilidade se originaram de um modo diferente - aproximadamente como indicado na Proposição I da Parte I.

¹¹ 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.

formavam o ângulo de $44^{\circ} 56'$ com as linhas em que teriam avançado sem refração¹². 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-las¹³ e conseqüentemente cerca de $54^{\circ} 4'$ ¹⁴. E os Raios incidiam perpendicularmente¹⁵ sobre a parede¹⁶. Ora, subtraindo o diâmetro do buraco do comprimento e largura da Imagem, restam 13 polegadas de comprimento e $2 \frac{3}{4}$ 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, $2^{\circ} 49'$.

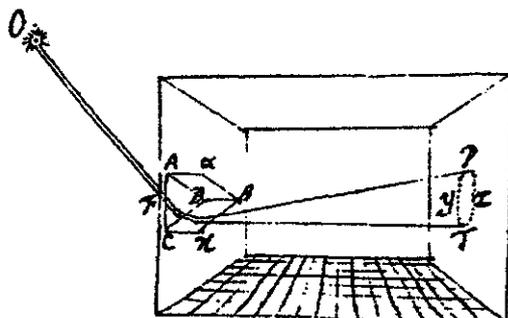


Fig. A.1.2 - Esquema de Newton (não publicado em 1672) para o primeiro experimento descrito em seu artigo de 1672: um feixe de luz solar passa por um prisma e forma uma mancha colorida alongada na parede oposta de um quarto escuro.

Tendo feito essas observações, primeiro computei delas o poder refrativo do vidro e encontrei-o medido pela *razão* dos senos, 20 para 31¹⁷. E então, por aquela *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

¹² Isto é, o desvio sofrido pelos raios incidentes era $\delta = 44^{\circ} 56'$.

¹³ 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

¹⁴ 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 $2i = \delta + A = 108^{\circ} 8'$.

¹⁵ Quando a luz não incide perpendicularmente sobre o anteparo a imagem formada é oblonga independentemente da constituição da luz.

¹⁶ Sobre as condições necessárias para se realizar o experimento veja as discussões sobre a Proposição II, Parte I.

¹⁷ Como Newton usava a relação entre os senos invertida em relação à usada hoje, obteve que $\sin i / \sin r = 20 / 31$. 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 cálculo de Newton: nas condições do experimento, o ângulo de incidência da luz na primeira face do prisma era de $54^{\circ} 4'$ e o ângulo de refração era a metade do ângulo do vértice do prisma, ou seja, $31^{\circ} 36'$. Calculando-se o índice de refração do vidro, obtém-se 1,545 ou, aproximadamente, $1,55 = 31/20$, conforme calculado por Newton.

deveriam compreender um ângulo de cerca de 31' como faziam antes de incidir [no prisma]¹⁸.

Esse cálculo estava fundamentado na Hipótese da proporcionalidade dos *senos* da Incidência e da Refração. Por minha própria experiência¹⁹, eu não poderia imaginar que ela fosse tão errônea que fizesse aquele Ângulo de apenas 31', quando na realidade era 2° 49' ²⁰. 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 variada²¹. 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' ²².

¹⁸ Newton 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. Veja as discussões sobre a Proposição II, Parte I e os Apêndices 3 e 4.

¹⁹ Na versão manuscrita publicada na *Correspondence* existem as palavras "e outras", se referindo à experiência de outras pessoas.

²⁰ Como 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 Apêndice 3. 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.

²¹ Ao 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.

²² Quando 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 discussão sobre a Proposição II, Parte I.

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 parede. 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 para o outro²³. 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 distância²⁴.

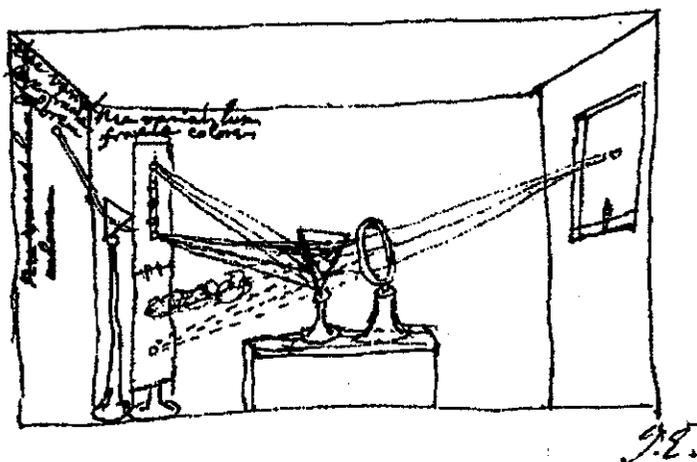


Fig. A.1.3 - Esquema de Newton (não publicado em 1672) que mostra uma das variantes do *experimentum crucis*. A luz proveniente do Sol é decomposta por um primeiro prisma. Uma lente, colocada antes do prisma, focalizada sobre um anteparo, permite produzir um espectro fino e com cores bem definidas. Um 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. O texto em latim da figura é “Nec variat lux fracta colorem”, isto é, “a cor da luz desviada não varia”²⁵.

A remoção gradual dessas suspeitas finalmente levou-me ao *Experimentum Crucis*, 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

²³ Essa hipótese sugerida por Newton é semelhante à explicação de Descartes para o surgimento de cores. Para maiores detalhes na teoria de Descartes sobre luz e cores as discussões sobre a Proposição II, Parte I e o capítulo 2 do *Theories of light*.

²⁴ Se 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.

²⁵ *Never at rest*, p. 796.

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 vi 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* que, sem qualquer diferença em suas incidências, foram, de acordo com seus graus de refrangibilidade, transmitidos em direção a diversas partes da parede.

Quando entendi isso, deixei meus trabalhos com Vidro acima mencionados; pois vi que a perfeição de Telescópios era limitada²⁶, não tanto devido à necessidade de vidros com formas exatas de acordo com a prescrição de Autores Ópticos (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 total²⁷. 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 Abertura²⁸, o que é uma irregularidade algumas centenas de vezes maior do que aquela

²⁶ Essa 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* (Proposição III, Parte II) que a construção de tais lentes acromáticas era impossível.

²⁷ É 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.

²⁸ Utilizando 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 F_1 a distância focal para os raios vermelhos e F_2 a distância focal para os raios violetas extremos. Teríamos $F_1 \cong (1+1/25) \cdot F_2$. A região onde a luz proveniente da lente estaria mais concentrada não seria em nenhum

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*²⁹.

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 comunicar-lhe 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 irregularidades numa refratora³⁰, de tal modo que seria 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 Interveniente³¹ 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 Instrumento³².

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

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.

²⁹ Aqui, Newton está se referindo a problemas causados pela aberração esférica de lentes - que é um problema muito menor do que o de aberração cromática.

³⁰ É 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 (e não 5 ou 6 vezes maiores) do que os defeitos em lentes.

³¹ Devido 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, 1980.

³² Newton 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 1672 (ibid.).

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 objeto é colocado.

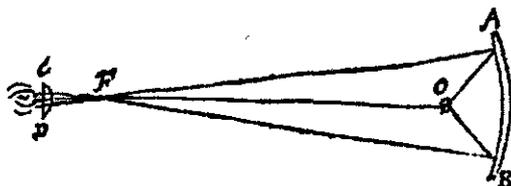


Fig. A.1.4 - Desenho do artigo de Newton (1672), mostrando esquema para microscópio refletor. AB é um espelho, próximo a cujo foco é colocado o objeto O. CD é uma lente ocular.

[p. 3081] Mas, para voltar dessa digressão, informei-lhe que a Luz não é similar ou homogênea, mas consiste de Raios *diformes*, 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.

Agora prosseguirei para informá-lo de outra diformidade mais notável nesses Raios, pela qual a *Origem das Cores* é revelada³³. 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 particular³⁴. 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 diferentes nos diversos Raios³⁵. 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 intermediárias.

³³ Na 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 (...)".

³⁴ Aqui 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 V.

³⁵ 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.

2. Ao mesmo grau de Refrangibilidade sempre pertence a mesma cor e à mesma cor sempre pertence o mesmo grau de Refrangibilidade³⁶. 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 agora³⁷. Quando qualquer tipo de Raios foi bem [p. 3082] separado daqueles de outros tipos, ele depois reteve obstinadamente sua cor, apesar de meus maiores esforços para mudá-la. Refratei-o com Prismas e refleti-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.]³⁸ 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 outra³⁹. 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 composição⁴⁰. 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

³⁶ 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.

³⁷ 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).

³⁸ No artigo original, foi omitido o número desta Proposição.

³⁹ 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.

⁴⁰ 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.

separação. E pela mesma razão, as Transmutações⁴¹ 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 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* intercaladamente.

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 Intermediárias⁴².

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 intermediário⁴³.

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 devida⁴⁴. 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 sensivelmente 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 devem 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

⁴¹ Na *Correspondence*, 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 "Transmu-tations". Depois dessas páginas a carta prossegue.

⁴² Sobre o número de cores do espectro veja as discussões sobre a Proposição III. Parte II.

⁴³ Na 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.

⁴⁴ Não é verdade que sejam necessárias *todas* as cores do espectro para produzir o branco. Veja as discussões sobre a Proposição V, Parte II.

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 iris* 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*⁴⁵.

11. Os Fenômenos ímpares de uma infusão de *Lignum Nephriticum*, *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 base⁴⁶. 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 opacos; pois se um transmite apenas vermelho e o outro apenas azul, nenhum raio pode passar através de ambos⁴⁷.

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

⁴⁵ Newton 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. Para mais detalhes veja as discussões sobre a Proposição IX, Parte II.

⁴⁶ Esses experimentos já haviam sido discutidos por Boyle em 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. pp. 198-212, e estudados por Newton em seu *Notebook*, pp. 466-67.

⁴⁷ A 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.

entanto com essa diferença, que eles são mais brilhantes e vívidos na luz de suas próprias cores à luz do dia. *Minium*⁴⁸ 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*⁴⁹ apareceu indiferentemente de qualquer 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.

Essa 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*⁵⁰. 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 Fantasmas⁵¹ das Cores. E não misturarei conjecturas com certezas⁵².

Reverendo 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 raio⁵³ (suponhamos uma grande lente Objetiva de

⁴⁸ Pigmento de óxido de chumbo, de coloração vermelha usado na fabricação de tintas.

⁴⁹ Em inglês também é "blue bice", designando um tipo de esmalte de uma cor azul.

⁵⁰ Newton 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.

⁵¹ A palavra fantasma era usada como sinônimo de espectro.

⁵² Na 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.

⁵³ Newton 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

um telescópio de três pés) a 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*.

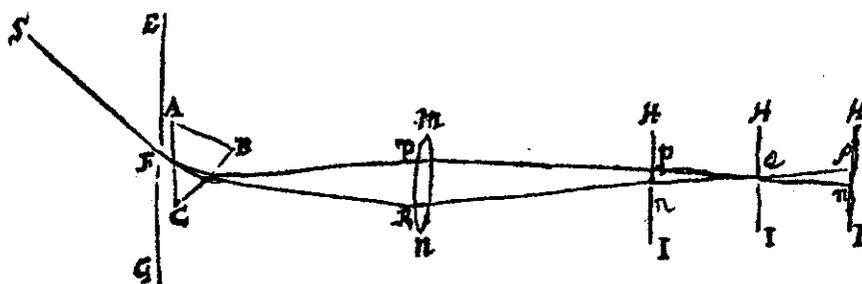


Fig. A.1.5 - Desenho do artigo de Newton (1672), mostrando experimento de recomposição da luz branca a partir das cores produzidas pelo prisma. A luz do Sol atravessa uma fenda e passa por um prisma ABC. O espectro produzido passa por uma lente mn que concentra a luz no ponto Q. Deslocando-se um papel 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.

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 $2 \frac{1}{2}$ 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 p e *Azul* e *Púrpura* em P, p e π. [p. 3087]

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

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.

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 ele⁵⁴.

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 algum⁵⁵.

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

⁵⁴ Esse 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.

⁵⁵ Após 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, Huygens, Hooke e Pardies. 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. Apesar de aceitar como corretos os experimentos, Hooke continuou a negar a *teoria* de Newton.

APÊNDICE 2 - DESVIO DA LUZ POR UM PRISMA: CASO GERAL

A análise do desvio de um raio de luz por um prisma não é um problema simples. Em geral é um problema tridimensional bastante complexo que não é discutido pelos livros de óptica.

Seja um sistema de coordenadas esféricas com o eixo z perpendicular a primeira face do prisma. O eixo x está sobre essa face, sendo paralelo ao eixo do prisma. O eixo y também está sobre essa face (fig. A.2.1).

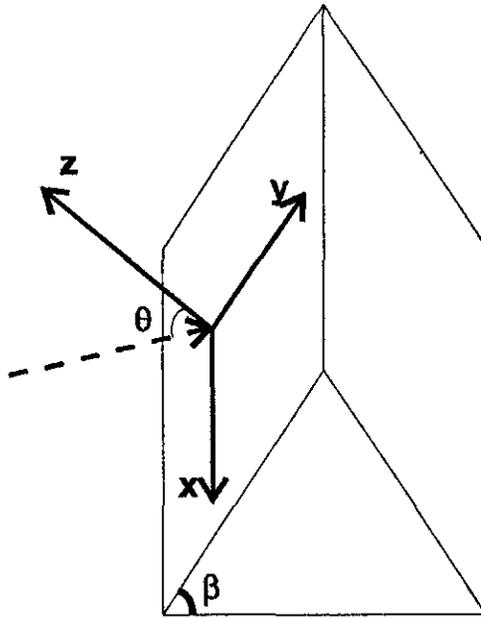


Fig. A.2.1

Seja um raio incidente representado pelo vetor $\mathbf{I} = (I, \theta, \varphi)$. O ângulo de incidência desse raio é a coordenada θ ; a coordenada φ é o ângulo que a projeção do raio incidente sobre o plano xy faz com o eixo x . O raio refratado é representado pelo vetor $\mathbf{I}' = (I, \theta', \varphi')$, onde o ângulo θ' é o ângulo de refração e $\varphi' = \varphi + \pi$. De acordo com a lei da refração de Snell-Descartes temos

$$\sin \theta' = (\sin \theta)/n.$$

Representemos as projeções desse raio em dois planos: um perpendicular ao eixo do prisma, isto é, paralelo ao plano $y-z$, e outro paralelo a base do prisma (Figs. A.2.2 e A.2.3).

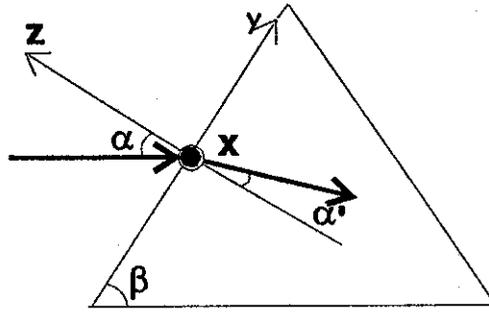


Fig. A.2.2

Na primeira projeção o raio incidente forma um ângulo α com a normal à superfície. É fácil ver que

$$\tan \alpha = I_y/I_z = I \sin \theta \sin \varphi / I \cos \theta = \tan \theta \sin \varphi.$$

A projeção do raio refratado forma um ângulo α' com a normal e obedece a uma relação análoga:

$$\tan \alpha' = I_y'/I_z' = I \sin \theta' \sin \varphi' / I \cos \theta' = \tan \theta' \sin \varphi' = - \tan \theta' \sin \varphi$$

Como a relação entre θ' e θ é conhecida pela lei de Snell-Descartes temos

$$\tan \alpha' = - \tan \theta' \sin \varphi = - (\sin \theta \sin \varphi / n) (1 - \sin^2 \theta/n^2)^{-1/2}$$

Podemos testar se o ângulo formado pela projeção dos raios incidentes e refratados obedecem a lei de Snell-Descartes. Para tal precisamos encontrar $\sin \alpha'$ e $\sin \alpha$ através das relações trigonométricas entre cosec α e $\tan \alpha$.

Como

$$\text{cosec}^2 \alpha = \tan^2 \alpha + 1$$

portanto

$$\sin \alpha = (\tan^2 \alpha + 1)^{-1/2}$$

Temos uma relação análoga para α' . Escrevendo essa expressão em termos dos ângulos θ e φ , temos:

$$\sin \alpha = [(\tan \theta \sin \varphi)^2 + 1]^{-1/2}$$

e

$$\sin \alpha' = [(\tan \theta' \sin \varphi)^2 + 1]^{-1/2}$$

Substituindo em ambas as expressões $\tan \alpha$ em função de $\sin \alpha$ e usando a lei de Snell-Descartes para o ângulo de incidência θ , resulta

$$\sin^{-1} \alpha = \sqrt{\frac{(\sin \theta \cdot \sin \varphi)^2}{(1 - \sin^2 \theta)} + 1}$$

e

$$\sin^{-1} \alpha' = \sqrt{\frac{(\sin \theta \cdot \sin \varphi)^2}{(n^2 - \sin^2 \theta)} + 1}$$

portanto temos:

$$\sin \alpha / \sin \alpha' = \frac{\sqrt{\frac{(\sin \theta \cdot \sin \varphi)^2}{(n^2 - \sin^2 \theta)} + 1}}{\sqrt{\frac{(\sin \theta \cdot \sin \varphi)^2}{(1 - \sin^2 \theta)} + 1}},$$

que é o mesmo que

$$\sin \alpha / \sin \alpha' = \frac{\sqrt{(\sin \theta \cdot \sin \varphi)^2 + (n^2 - \sin^2 \theta)}}{\sqrt{(\sin \theta \cdot \sin \varphi)^2 + (1 - \sin^2 \theta)}}.$$

Como podemos ver a projeção no plano perpendicular ao eixo do prisma do raio incidente com um ângulo qualquer não obedece a lei de Snell-Descartes, mas se fizermos $\varphi = \pi/2$ ou $3\pi/2$, a equação acima se reduz a

$$\sin \alpha / \sin \alpha' = n,$$

significando que somente a projeção do raio que está no plano principal obedece a lei de refração.

Para estudar a projeção do raio no plano paralelo a base do prisma usaremos um sistema de coordenadas esféricas com o eixo z' perpendicular a esse plano. Os eixos x' e y' também estão no plano paralelo e são projeções dos eixos x e y que estão no plano perpendicular a superfície do prisma. A projeção do raio nesse plano forma um ângulo δ com os eixos x' e y' . De acordo com a figura A.2.2 temos

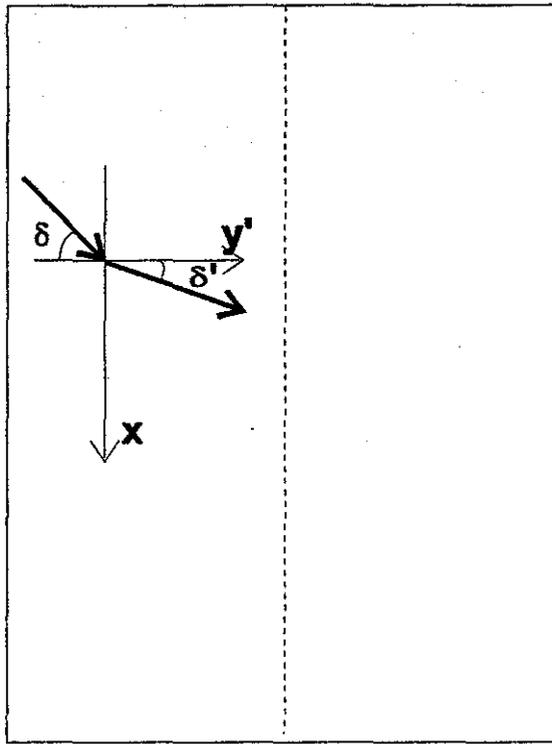


Fig. A.2.3

$$x = x' = I \sin\theta \cos\varphi,$$

e

$$y' = I (\sin\theta \sin\varphi \cos\beta - \cos\theta \sin\beta).$$

Dessa maneira,

$$\tan \delta = x'/y' = \frac{\sin\theta \cos\varphi}{\sin\theta \sin\varphi \cos\beta - \cos\theta \sin\beta}.$$

Usando a lei de Snell-Descartes para o ângulo de incidência θ obtemos a projeção da refração do raio, isto é, δ' .

$$\tan \delta' = \frac{\sin\theta \cos\varphi}{\sin\theta \sin\varphi \cos\beta + \sin\beta \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}$$

Para calcular a refração da projeção usamos a lei de Snell-Descartes para o ângulo δ . Das relações trigonométricas podemos encontrar $\sin \delta$ e $\sin \delta'$ a partir de $\text{tg}\delta$ e $\text{tg}\delta'$:

$$\sin\delta = \frac{\sin\theta \cos\varphi}{\sqrt{(\sin\theta \sin\varphi \cos\beta - \cos\theta \sin\beta)^2 + \sin^2\theta \cos^2\varphi}}$$

e

$$\sin \delta = \frac{\sin \theta \cos \varphi}{\sqrt{(\sin \theta \sin \varphi \cos \beta - \sin \beta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})^2 + \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}},$$

portanto

$$\frac{\sin \delta}{\sin \delta} = \frac{(\sin \theta \sin \varphi \cos \beta - \cos \theta \sin \beta)^2 + \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}{(\sin \theta \sin \varphi \cos \beta - \sin \beta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})^2 + \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}.$$

Como podemos ver a equação acima somente concorda com a lei de Snell-Descartes quando $\varphi=0$ ou π e $\beta = \pi/2$, o que significa que o raio incidente está no plano principal.

APÊNDICE 3 - A DEMONSTRAÇÃO DE NEWTON PARA A FORMA CIRCULAR DA IMAGEM PRODUZIDA PELO PRISMA

Em seu trabalho *Lectiones opticae*¹, Newton demonstrou que, se um prisma é ajustado na posição de mínimo desvio, a imagem formada quando a luz passa através dele é redonda.

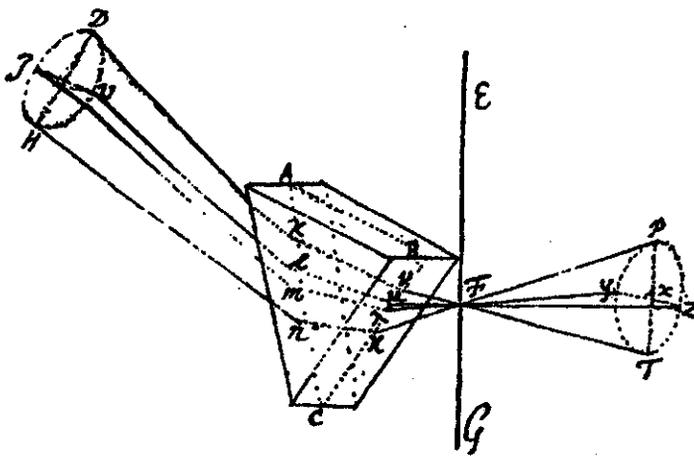
A figura A.3.1 mostra o esquema de Newton para provar "que existe, no entanto, uma certa posição do prisma na qual, de acordo com a visão aceita, a imagem do Sol deve aparecer circular". Para mostrar essa afirmação Newton colocou o prisma perto de um pequeno buraco F no anteparo EG.

Newton assumiu "que ABC é um plano cortando perpendicularmente os planos refrativos AC e BC passando também através do buraco F e do centro do Sol DIHV, que o bissecta ao redor do diâmetro DH". Os raios incidente e refratado estão nesse plano.

Os raios vindos do diâmetro do Sol são refratados pelo prisma e passam através do buraco F formando o diâmetro PT da imagem PYTZ.

O prisma é colocado de tal maneira que sua "inclinação em relação aqueles raios é tal que os ângulos AKD e BκF sejam iguais". Isto é equivalente a ajustar o prisma na posição de mínimo desvio, pois nessa posição um pequeno aumento do ângulo de incidência é igual ao decréscimo do ângulo de refração. Nessa posição do prisma os ângulos PFT e YFZ são iguais.

Newton provou que os ângulos PFT e YFZ são iguais: "Imagine um raio que vem de P através de κ para N, enquanto outro raio procede de D através de K e v. Portanto, como os ângulos AKD e BκF são assumidos iguais " (como dito acima) "os ângulos AKv e BκN (...) também serão iguais. Concordantemente, como os ângulos AKD e BκF bem como os ângulos ANH e BvF são iguais, suas diferenças também serão iguais; isto é, os ângulos vFκ e PFT serão iguais ao ângulo formado entre os raios DK e HN ou ao diâmetro solar. O ângulo PFT é portanto igual ao diâmetro solar."



¹ *Optical lectures*, pp. 53-61.

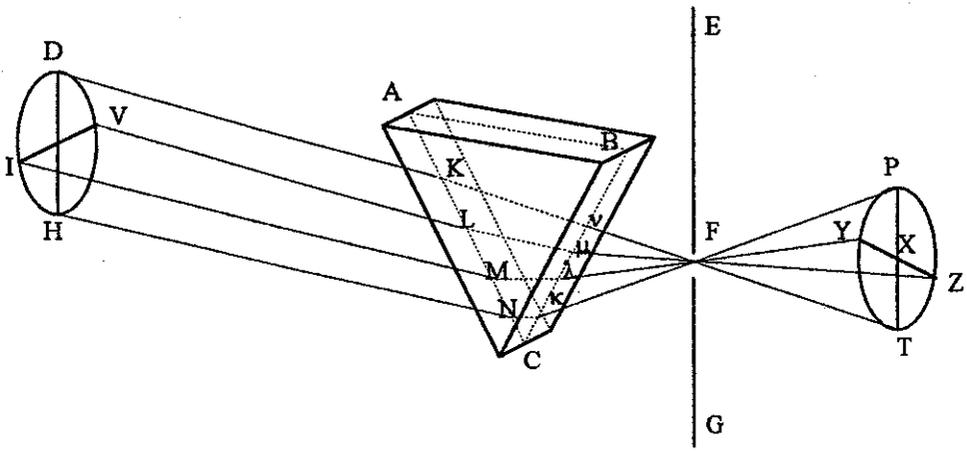


Fig. A.3.1

Assim Newton provou a primeira parte de sua proposição. Agora resta provar o mesmo para o ângulo do feixe paralelo ao eixo. Essa demonstração é difícil e apresenta um argumento geométrico bastante interessante. Não encontramos nada equivalente a ela nos livros-texto modernos.

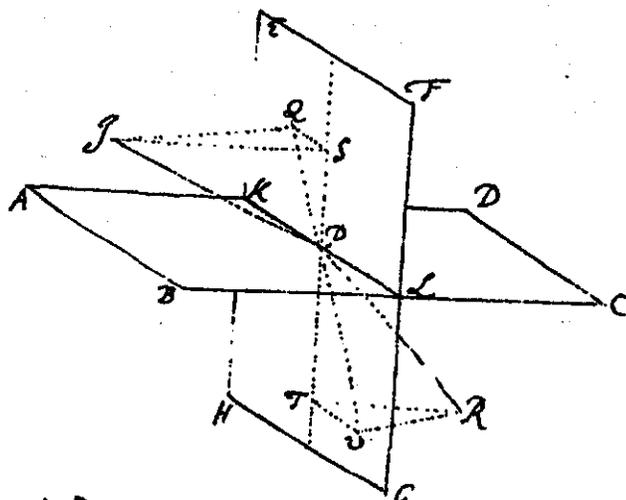
Para provar que o ângulo YFZ é igual ao diâmetro do Sol e assim provar que é igual ao ângulo PFT, Newton primeiro demonstrou uma proposição auxiliar (*lemma*) e então a aplicou ao Sol e sua imagem.

Na figura A.3.1, IP é um raio incidente e PR o raio refratado. Suponha que seus comprimentos sejam iguais. As linhas IQ e RV são perpendiculares ao plano EFGH. "IPQ será o ângulo de incidência que o raio IP faz com o plano perpendicular FH, e RPV será o ângulo que o raio refratado PR faz com o mesmo plano; similarmente, IPS será o ângulo de incidência e RPT o ângulo de refração."

A lei de Snell-Descartes se aplica aos senos dos ângulos PFT e YFZ. Newton deseja obter a relação entre os ângulos IPQ e RPV.

"(...) as linhas IQ e IS que contém os ângulos QIS são paralelas as linha RV e VT que contém o ângulo VRT. Portanto os ângulos QIS e VRT são iguais. Desenhando QS e VT os ângulos IQS e RVT serão ângulos retos (...). Portanto os triângulos IQS e RVT são similares, e $IQ : RV = IS : RT$ ".

Como IQ e RV são perpendiculares ao plano FH é evidente que $IQ = IP \text{ sen}IPQ$, $RV = RPV$, $IS = IP \text{ sen}IPS$ e $RT = RT \text{ sen}RPT$.



*incidentia ad sinum refractionis; et
Sumpti enim radij JP et PR*

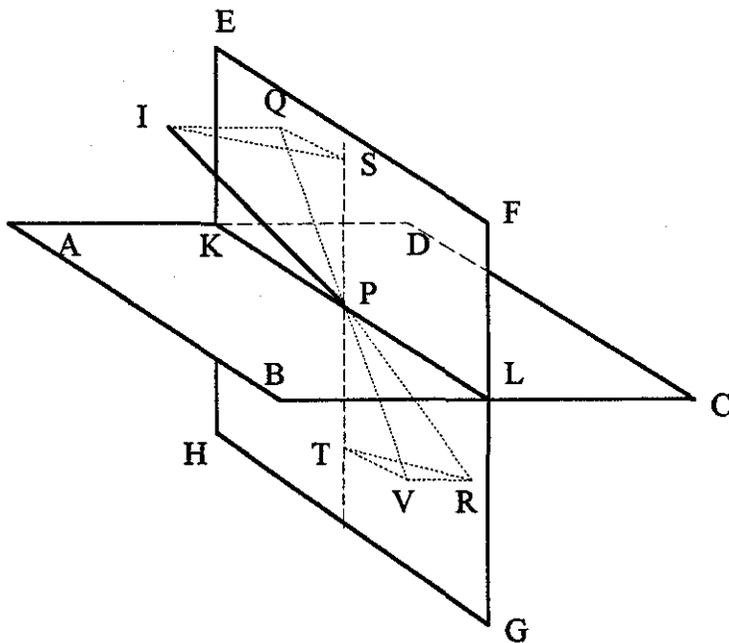


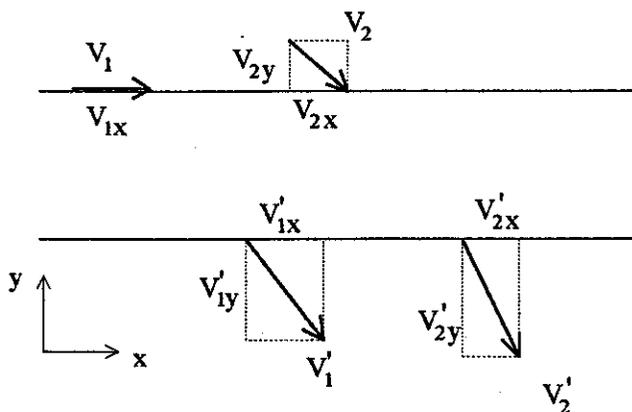
Fig. A.3.2

Newton retorna à demonstração de que YFZ é igual ao ângulo formado pelo diâmetro solar e conseqüentemente igual ao ângulo PFT . O plano $DKNH$ é assumido como normal ao prisma e "bissecta o ângulo formado pelos raios IM e VL (...). Como tal ângulo é igual ao diâmetro solar, o ângulo que um dos raios, por exemplo, IM , faz com tal plano será igual ao raio do Sol; seja α seu seno e β o seno do ângulo que o raio refratado $M\lambda$ faz com o mesmo plano." Agora Newton fez uso do *lemma* e concluiu que $\alpha/\beta=n$.

Concordantemente, como o plano DHF é também perpendicular ao outro plano do prisma BC, que refrata os raios de um meio mais denso para um menos, e além disso como β é assumido ser o seno do ângulo que o raio incidente $M\lambda$ faz com aquele plano perpendicular DHF, pelo *lemma* precedente α será o seno do ângulo que o raio refratado λF faz com o mesmo plano DHF." Isto é, embora a direção do raio muda em ambas as refrações, o ângulo entre os raios e o plano principal é igual sempre. Mas α é assumido ser o seno do raio do Sol, e assim o tal ângulo que o raio refratado λF faz com o plano DHF é igual ao raio solar e seu dobro, $\lambda F\mu$ ou YFZ, é igual ao diâmetro inteiro. Além disso, como foi mostrado que o ângulo PTF é igual ao mesmo diâmetro, aqueles dois ângulos YFZ e PFT são iguais". A prova está completa e mostrou-se que a imagem deve ser circular.

APÊNDICE 4 - A DEMONSTRAÇÃO TEÓRICA DE NEWTON PARA A LEI DA REFRAÇÃO¹

Galileo já havia mostrado² que quando dois corpos descem uma mesma altura no campo gravitacional, sejam quais forem seus percursos (e direções dos movimentos), eles adquirem iguais velocidades. Se isso é válido para corpos que partem do repouso, é fácil mostrar que também é válido para corpos que possuem velocidades iniciais iguais, pois pode-se considerar como se eles tivessem partido de um outro ponto com velocidades nulas³.



Nessa figura, V_1 é a velocidade de um corpo que entra rasante na região sob influência da força, sua componente perpendicular é nula, logo a componente paralela é $V_1 = V_{1x}$, V_2 é a velocidade de outro corpo, cujas componentes são V_{2x} e V_{2y} . As velocidades com que os corpos deixam de sofrer influência da força são V'_1 cujas componentes são V'_{1x} e V'_{1y} , e V'_2 , cujas componentes são V'_{2x} e V'_{2y} .

Como dito anteriormente, $V_1 = V_2$, $V'_1 = V'_2$. As componentes das velocidades finais paralelas à superfície são iguais às de incidência pois a força só age na direção y .

Assim,

$$V_1 = \sqrt{V_{1x}^2 + V_{1y}^2} = \sqrt{V_1^2 + V_{1y}^2} \quad e$$

$$V_2 = \sqrt{V_{2y}^2 + V_{2x}^2} \quad \text{mas,}$$

$$V_1 = V_2 \quad e \quad V_1 = V_2 = \sqrt{V_{2x}^2 + V_{2y}^2}.$$

¹ Esse Apêndice é relativo à Proposição VI, Parte I.

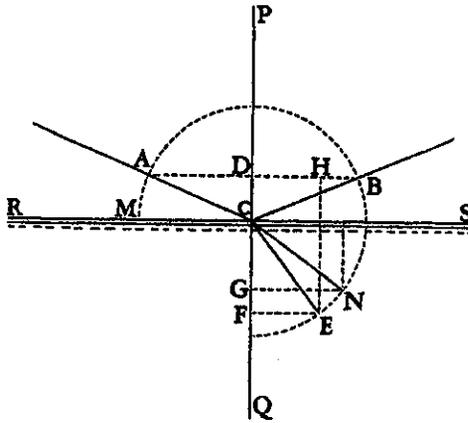
² GALILEO, *Dialogues concerning two new sciences*, pp. 169-72.

³ Atualmente, consideraríamos isso como uma consequência da conservação da energia: se as velocidades iniciais são iguais e se as alturas de queda (variações de energia potencial) são iguais, as velocidades finais devem ser também iguais. Embora já houvesse o conceito de "forças vivas", Newton não poderia ter pensado dessa maneira pois ainda não havia o conceito de energia potencial devida a presença de uma força.

Igualando-se as expressões de V'_1 e V'_2 e substituindo V'_1 pela expressão acima, obtém-se:

$$V_{2y}^2 = V_2^2 + V_{1y}^2$$

Newton utilizou esse tipo de resultado, com outra notação, na seguinte dedução: Supôs um raio incidindo ao longo do segmento MC no ponto C da superfície RS, formando um ângulo de quase 90° com a normal PQ e sendo refratado ao longo de CN. Considerou nula a componente perpendicular desse raio e a paralela à superfície considerou igual ao segmento MC.



Após a refração a componente paralela à superfície não muda, de tal modo que

$$V_{1x} = V'_{1x} = V'_1 \text{sen}(GCN) = V'_1 \frac{GN}{CN} = MC, \text{ de onde obtém-se}$$

$$V'_1 = \frac{MC}{GN} CN,$$

então a componente perpendicular da velocidade do raio refratado é

$$V'_{1y} = V'_1 \frac{CG}{CN} = \frac{MC}{GN} CG.$$

Do mesmo modo podemos calcular a componente perpendicular de um outro raio AC cuja incidência não é rasante à superfície. Sua componente paralela antes da refração é AD e não é alterada pela força, logo

$$AD = CE \cdot EF \Rightarrow CE = \frac{AD}{EF} \quad \text{e}$$

$$V_{2y} = CE \cdot CF = \frac{AD}{EF} \cdot CF$$

Pela proposição mostrada anteriormente:

$$V_{2y}^2 = V_{2x}^2 + V_{1y}^2, \quad \text{ou seja,}$$

$$\frac{AD^2}{EF^2} \cdot CF^2 = CD^2 + \frac{MC^2}{NG^2} \cdot CG^2 \quad (1)$$

Os módulos das velocidades dos raios incidentes são iguais:

$$AC^2 = MC^2 - DC^2$$

que somados na equação (1), resulta:

$$AC^2 + \frac{AD^2 CF^2}{EF^2} = MC^2 - CD^2 + CD^2 + \frac{MC^2}{NG^2} \cdot CG^2$$

calculando o m.m.c. dos dois lados, temos:

$$\frac{EF^2 AD^2 + AD^2 CF^2}{EF^2} = \frac{MC^2 NG^2 + MC^2 CG^2}{NG^2},$$

isto é,

$$\frac{AD^2}{EF^2} (EF^2 + CF^2) = \frac{MC^2}{NG^2} (NG^2 + CG^2)$$

Mas $EF^2 + CF^2 = V_1^2$ e $NG^2 + CG^2 = V_2^2$ e, como os módulos das velocidades dos raios após a refração também são iguais, temos:

$$\frac{AD^2}{EF^2} = \frac{MC^2}{NG^2},$$

mas AD é o seno da incidência e EF da refração do raio AC; MC é o seno da incidência e NG da refração do raio MC, ou seja:

$$\frac{\text{sen } i_2}{\text{sen } r_2} = \frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } r_1} = \text{cte} = n \quad (2)$$

Newton não derivou no *Opticks* uma relação dos senos em termos das velocidades. Mas tal relação pode ser deduzida, combinando com a equação (2) com a suposição que as componentes paralelas das velocidades não mudam, isto é, $V_1 \text{sen } i = V_2 \text{sen } r$, assim temos

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{V_r}{V_i} = n,$$

como havia mostrado Descartes.

APÊNDICE 5 - HISTÓRIA DA CIÊNCIA E ENSINO, UMA ARMADILHA PERIGOSA¹

É quase senso comum afirmar que a História da Ciência pode ser útil no ensino de ciências. De fato, há um crescente uso da História da Ciência pelos professores, tanto no primeiro e segundo graus quanto na universidade. A maneira de usá-la depende do objetivo educacional e do tipo de estudantes em vista.

O objetivo pode ser ensinar os conceitos e teorias científicas, a natureza da ciência e seu método, a relação entre ciência e o contexto social, etc. O público pode incluir futuros cientistas, alunos de outras áreas, futuros professores, etc. O uso da História da Ciência é particularmente comum quando o ensino da ciência é endereçado à não cientistas². No entanto, podem haver algumas armadilhas em seu uso. Tomemos como exemplo o uso que Towne³ fez da teoria das cores de Newton.

Towne usou a apresentação original de 1672 feita por Newton de sua teoria, juntamente com outros experimentos, para ensiná-la a estudantes não cientistas. Argumentou que a o trabalho de Newton é claro, fácil e até mesmo prazeroso de ser lido e entendido. Afirmou que esse artigo é um bom exemplo para se apresentar o método científico para os estudantes e também enfatizou como é fácil se chegar às conclusões corretas a partir dos experimentos de Newton.

A análise feita por Towne e o uso do artigo de Newton são altamente problemáticos. Como foi discutido ao longo da dissertação, os argumentos de Newton não são tão diretos quanto parecem. O próprio Towne não entendeu a importância de alguns aspectos da argumentação newtoniana. Além disso, a interpretação do método científico implícita em seu artigo destoa do conhecimento científico e histórico correntes.

Em suas considerações sobre o experimento com um prisma do artigo de 1672, fica claro que Towne não deu importância alguma à posição no qual o prisma deveria estar colocado para que os questionamentos de Newton fizessem sentido. Em nenhum lugar em seu artigo, Towne se refere à posição de mínimo desvio. Pelo contrário: em sua nota 7, diz que

(...) embora não seja essencial em nenhum experimento descrito no artigo de Newton, para preservar o sentido de reprodutibilidade é aconselhável ajustar o prisma tal que para alguma cor, ele esteja na posição de mínimo desvio.⁴

Isso não é verdade. Se o prisma está numa posição diferente da de mínimo desvio, nada pode ser concluído do experimento - como mostrou Pardies.⁵

O que é possível concluir do experimento em questão? Como discutido na proposição II, parte I, *não* é possível concluir que a luz do Sol é uma mistura de raios, como Towne afirma:

¹ A discussão desse Apêndice foi baseada no artigo MARTINS e SILVA (a ser publicado)

² Veja por exemplo: GROSS, 1980; HETHERINGTON, 1982.

³ TOWNE, 1993.

⁴ TOWNE, 1993, 115.

⁵ Veja as discussões sobre a posição de mínimo desvio na Proposição II, Parte I.

(...) a forma oblonga do espectro pode ser medido com uma régua, e é evidência suficiente para a declaração que luz consiste em "raios diformes, alguns dos quais são mais refrangíveis que outros".⁶

De fato, Newton e vários de seus coetâneos (Pardies, Hooke, Huygens, etc) sugeriram várias explicações possíveis para esse efeito.

O experimento com o prisma ajustado na posição de mínimo desvio, foi um experimento elaborado após uma análise teórica. O conceito ingênuo de alguém ir ao laboratório com a "mente vazia" ou que os "experimentos falam por eles mesmos" (como Towne coloca) é um velho mito científico. Quando Newton elaborou sua teoria das cores, ele estava profundamente envolvido por algumas teorias sobre a luz e já havia feito cálculos sobre a forma esperada do espectro. A teoria guia os experimentos e não o contrário - como Towne pensa.

A discussão feita na proposição II mostrou que a questão da heterogeneidade da luz branca não é simples. Towne não a discute e afirma:

(...) a simplicidade dos experimentos e a ordem que Newton os apresenta leva a que a teoria se forme na cabeça dos estudantes antes de Newton estabelecer suas hipóteses formalmente.

De acordo com ele, os estudantes serão levados à mesma teoria que Newton e concluirão que a luz branca é uma mistura de raios. Entretanto, como mostrado na dissertação, essa conclusão não é direta e há outras interpretações possíveis para os experimentos de Newton.

Para ilustrar suas idéias, Towne sugeriu um experimento que contradiz a teoria de Newton. Afirmou que tiras azul e vermelha de papel iluminadas pela luz espectral aparecem pretas e, dependendo da parte do espectro que as atinge, podem aparecer brancas. De acordo com a teoria de Newton, um objeto aparece da cor da luz que o ilumina. No caso de objetos coloridos, eles nunca podem aparecer brancos.

De acordo com os comentários de Towne, parece que seus objetivos ao usar o artigo de Newton são:

- exibir um conceito particular de método científico (indutivismo);
- mostrar que trabalhos científicos podem ser claros e interessantes mesmo quando lido por não-cientistas;
- ensinar física (a teoria clássica de cores).

Analisemos cada um desses pontos individualmente:

- Método científico

Algumas vezes, professores de física (mesmo universitários), não entendem a natureza da ciência. Ainda há uma crença no método indutivista da investigação científica, do pior tipo de positivismo⁷. Geralmente, professores que não tem treino

⁶ TOWNE, 1993, p. 115.

⁷ De acordo com Abimbola, há uma grande diferença entre o conceito de ciência ensinada pelos professores e os resultados da história e filosofia da ciência pós-1950. Veja ABIMBOLA, 1983. Veja

suficiente em ensinar história e filosofia da ciência transmitem uma visão distorcida do funcionamento da ciência para seus estudantes⁸. Algumas vezes eles não estão conscientes das dificuldades e tentam usar a história da ciência para simplificar o conteúdo a ser ensinado. Mas o tipo de história da ciência que usam é simplificada e distorcida - o tipo de coisa que os historiadores da ciência chamam "Whig history".⁹

O estudo cuidadoso da história da ciência pode ensinar muito sobre a natureza da ciência. Pumfrey¹⁰, por exemplo, lista alguns componentes importantes da visão contemporânea do trabalho científico:

1. A observação inicial não é possível sem idéias pré-existentes.
2. A natureza não apresenta evidências suficientes para que seja interpretada sem ambiguidades.
3. As teorias científicas não são induções, mas hipóteses imaginadas pelos cientistas e necessariamente vão além das observações.
4. As teorias científicas não podem ser provadas.
5. O conhecimento científico não é estático e convergente, mas mutável e aberto.
6. O treino é uma componente essencial para se compreender a ciência.
7. O raciocínio científico é influenciado por fatores sociais, morais, espirituais e culturais.
8. Os cientistas não elaboram deduções incontestáveis, mas fazem julgamentos complexos.
9. Desacordo é sempre possível.

É fácil perceber que a análise do artigo de 1672 de Newton feita na dissertação é um exemplo de muitas dessas componentes da natureza da ciência. Mas isso não pode ser percebido pela mera leitura do artigo de Newton. É muito complicado estudar uma parte do trabalho científico sem conhecer seu contexto. Uma apreciação refinada do artigo de Newton requer o conhecimento de seus próprios trabalhos sobre óptica e também de outros cientistas da época. É necessário *discutir e ler sob a luz de seu contexto* esse e todos os outros trabalhos científicos para que os pontos acima apareçam para o leitor. Apenas dessa maneira pode-se entender a verdadeira natureza do trabalho científico.¹¹

-Ciência para não cientistas

Muitos professores de ciência querem descartar a idéia de que a ciência é uma disciplina esotérica: qualquer um pode gostar e entender a ciência. Há uma certa verdade

também a discussão de Hodson sobre a relevância das correntes da filosofia da ciência para educação: HODSON, 1985.

⁸ Esse problema é discutido em MATTHEWS, 1988. Brush discute se é possível ensinar a história da ciência "real" ao invés de se continuar com a versão tradicional dos livros-texto: BRUSH, 1974. Veja também SIEGEL, 1979.

⁹ Veja RUSSELL, 1984.

¹⁰ Veja o artigo PUMFREY, 1991.

¹¹ Por essa razão, é melhor os professores usarem "estudos de casos" produzidos por historiadores da ciência profissionais do que um pedaço de uma fonte primária. Veja, por exemplo *Harvard case histories*. Dependendo dos objetivos, também é necessário estudar o contexto tecnológico, social e filosófico por trás do trabalho científico.

nisso: qualquer um pode gostar e entender *alguns aspectos* da ciência. Mas a ciência por si mesma é uma disciplina esotérica - exatamente como a música, por exemplo.

É possível para qualquer um gostar de música, mas apenas algumas pessoas são aptas a tocar um instrumento ou compor boa música. Para ser um bom pianista, qualquer pessoa deve passar por um treino técnico que pode gastar anos. Para ser um bom compositor, o treino pode ser ainda mais demorado. O mesmo tipo de coisa acontece com a ciência. Não se deve ver os cientistas como semi-deuses (é sempre bom lembrar que os cientistas são humanos), mas por outro lado, não se deve menosprezar o treino científico necessário para ser um bom cientista.

Ao se ensinar física para não cientistas, há sempre o perigo de se apresentar uma "ciência suavizada", evitando aspectos difíceis - como as medidas, equações, argumentos complexo, etc. Há, de fato, uma grande quantidade de coisas interessantes que podem ser ensinadas sem os detalhes técnicos. Ao contrário do que se pensa, porém, a História da Ciência não é a melhor maneira de se evitar os aspectos difíceis da ciência. Claro que se pode usar a história da ciência "externalista" para discutir aspectos tais como o desenvolvimento científico e tecnológico sem a análise dos aspectos "difíceis". Mas se o objetivo é ensinar a própria ciência através de sua história, é impossível evitar os aspectos técnicos. De fato, é mais fácil e rápido aprender em um livro-texto qualquer assunto científico que aprendê-lo através de sua história.

-Conhecimento científico

Há uma importante distinção entre *conhecimento* científico e *crença* científica. Ter conhecimento científico sobre um assunto significa saber os resultados científicos, aceitar esse conhecimento e *estar seguro* de aceitá-lo, porque se conhece como esse conhecimento é justificado e fundamentado¹².

Crença científica, por outro lado, corresponde ao conhecimento apenas dos resultados científicos e sua aceitação baseada na crença na *autoridade* do professor ou do "cientista". Fé científica é um tipo moderno de superstição. Mas é muito mais fácil adquiri-la que o conhecimento científico.

Há apenas um caminho para se adquirir conhecimento científico, no sentido dito acima. É através do estudo da história da ciência - mas não da "Whig history". É necessário estudar o contexto científico, as bases experimentais, as várias alternativas possíveis da época, e a dinâmica do processo de descoberta (ou invenção), justificação, discussão e difusão das idéias. Apenas desse modo é possível aprender como uma teoria foi justificada e porque foi aceita. Ao mesmo tempo, se aprende muito sobre a natureza da ciência.

A teoria das cores de Newton não é simples. De fato, atrás de sua aparente simplicidade há um profundo e complexo trabalho.

¹² Essa distinção foi apontada por ROGERS, 1982, embora de uma maneira um pouco diferente que a discutida aqui - ele assume que o conhecimento científico é *verdadeiro*. Claro que o conhecimento científico é útil e bem fundamentado, mas é temporário (e não *verdadeiro*, no sentido filosófico).

BIBLIOGRAFIA

1. ABIMBOLA, Isaac O. The relevance of the "new" philosophy of science for the science curriculum. *School Science and Mathematics* 83: 181-93, 1983.
2. ALONSO, M. e FINN, E. J. *Física: um curso universitário*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1972.
3. BACON, F. *Novum Organon*. São Paulo: Abril, 1972. (*Os Pensadores*)
4. 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.
5. BIERSON, G. Why did Newton see indigo in the spectrum? *American Journal of Physics* 40: 526, 1972.
6. BIRCH, Thomas. *The history of the Royal Society of London*. London: A. Millar, 1757.
7. BOCZKO, Roberto. *Conceitos de Astronomia*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.
8. 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.
9. BRUSH, Stephen G. Should the history of science be rated X? *Science* 183: 1164-72, 1974.
10. COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978.
11. CONANT, J. B. (ed.). *Harvard case histories in experimental science*, 2 vols. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1966.
12. 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.
13. GALILEI, Galileo. *Dialogues concernig two new sciences*. Trad. Henry Crew e Alfonso de Salvio. New York: Dover, 1954.
14. 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.
15. GROSS, Walter E. The history of science in the two-year college curriculum. *Journal of College Science Teaching* 10: 19-21, 1980.
16. GRUNER, S. M. Defending Father Lucas: A consideration of the Newton-Lucas dispute on the nature of the spectrum. *Centaurus* 17: 315-29, 1973.
17. GUERLAC, Henry. *Newton on the continent*. Ithaca: Cornell University Press, 1981.
18. 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.
19. HELMHOLTZ, Hermann von. On the theory of compound colors. *Philosophical Magazine* [4] 4: , 519-34, 1852.
20. HETHERINGTON, Norris S. The history of science and the teaching of science literacy. *Journal of Teaching* 17: 53-66, 1982.

21. HODSON, Derek. Philosophy of science, science and science education. *Studies in Science Education* 12: 25-57, 1985.
22. 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.
23. HOOKE, Robert. Hooke's critique of Newton's theory. Em BIRCH, Thomas. *The history of the Royal Society of London, 1672*. vol 3, pp. 10-5. Reproduzido em: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978, pp. 110-5. (HOOKE, 1672)
24. HUYGENS, Christiaan. *Tratado sobre a luz*. Trad. Roberto de Andrade Martins. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*. Suplemento 4/1986.
25. HUYGENS, Christiaan. An extract of a letter lately written by an ingenious person from Paris, containing some considerations upon Mr. Newton's doctrine of colours, as also upon the effects of the different refractions of the ray in telescopical glasses. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 8: 6086-7, 1673. Reproduzido em: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978, pp. 136-7. (HUYGENS, 1673a)
26. HUYGENS, Christiaan. An answer (to the former letter) written to the publisher June 10, 1673. by the same parisian philosopher. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 8: 6112, 1673. Reproduzido em: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978, p. 147. (HUYGENS, 1673b)
27. KOYRÉ, Alexandre. *Études Newtoniennes*. Paris: Gallimard, 1968.
28. KOYRÉ, A., COHEN, I. B. e WHITMAN, A. *Isaac Newton's Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, third edition (1726) with variant readings*. 2 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1972.
29. LINUS, Francis. A letter of the learn'd Franc. Linus, to a friend of his in London, animadverting upon Mt. Isaac Newton's theory of light and colours, formely printed in these Tracts. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 9: 217-9, 1675. Reproduzido em: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978, pp. 148-50. (LINUS, 1675a)
30. LINUS, Francis. A letter of Mr. Franc. Linus, written to the publisher from Liège the February 25, 1675 being a reply to the letter printed in Numb. 110. by way of answer to a former letter of the same Mr. Linus, concernig Mr. Isaac Newton's theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 10: 499-501, 1675. Reproduzido em: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978, pp. 151-2. (LINUS, 1675b)
31. LOHNE, J. A. Experimentum Crucis, *Notes and Records of the Royal Society* 23: 169-99, 1968.
32. LOHNE, Johannes A. Newton's "proof" of the sine law and his mathematical principles of colors. *Archive for History of Exact Sciences* 1: 389-405, 1960.
33. LOHNE, Johannes A. Isaac Newton: the rise of a scientist, 1661-1671. *Notes and Records of the Royal Society of London* 20: 125-39, 1964.

34. LUCAS, Anthony. Carta para Newton de 17/05/1676, reproduzida em NEWTON, Isaac. *The correspondence of Isaac Newton*. Ed. H. W. Turnbull. 7 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977, vol. 2, pp. 8-14. (1676a).
35. LUCAS, Anthony. Carta para Newton de 13/10/1676, reproduzida em NEWTON, Isaac. *The correspondence of Isaac Newton*. Ed. H. W. Turnbull. 7 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977, vol. 2, pp. 104-8. (1676b).
36. LUCAS, Anthony. Carta para Newton de 05/03/1677, reproduzida em NEWTON, Isaac. *The correspondence of Isaac Newton*. Ed. H. W. Turnbull. 7 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977, vol. 2, pp. 254-61. (1677).
37. MACH, Ernst. *Knowledge and error*. Dordrecht: D. Reidel, 1976.
38. MAMIANI, Maurizio. *Isaac Newton filosofo delle natura: Le lezioni giovanili di ottica e la genesi del metodo newtoniano*. Firenze: La Nuova Italia Editrice, 1976.
39. MARTINS, Roberto de A. e SILVA, Cibelle C. Newton's and color: the complex interplay of theory and experiment. (a ser publicado).
40. MATTHEWS, Michael R. A role for history and philosophy of science teaching. *Educational Philosophy and Theory* 20: 67-81, 1988.
41. Mc GUIRRE, J. E. e TAMNY, Martin. *Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
42. NEWTON, Isaac. *Opticks or, a treatise of the reflections, refractions, inflexions and colours of light*. London, 1704; Reeditado: New York: Dover, 1952.¹
43. NEWTON, Isaac. *The optical papers of Isaac Newton*. Ed. Alan E. Shapiro. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. *Vol 1: The optical lectures (1670-1672)*.
44. 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* 6 (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. (NEWTON, 1672a)
45. NEWTON, Isaac. Mr. Newton's letter of April 13, 1672, O. S. written to the editor being an answer to the foregoing letter of F. Pardies. Translated from the latin. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 7: 730-2, 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. 90-2. (NEWTON, 1672b)
46. NEWTON, Isaac. Mr. Isaac Newton answer to some considerations upon his doctrine of light and colours; wich doctrine was printed in Numb. 80 of these Tracts. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 7: 5084-103, 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. 116-35. (NEWTON, 1672c)
47. NEWTON, Isaac. Mr. Newton answer to the foregoing letter further explaining his theory of light and colours, and particularly that of whiteness; together with his continued hopes of perfecting telescopes by reflections rather than refractions. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 8: 6087-92, 1673. Reproduzido em: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers &*

¹ A tradução integral dessa obra, feita pelo prof. André K. T. Assis, está sendo publicada pela EDUSP.

- letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978, pp. 137-42. (NEWTON, 1673a)
48. NEWTON, Isaac. An extract of Mr. Isaac Newton's letter, written to the publisher from Cambridge April 3, 1673. concerning the number of colors, and the necessity of mixing them all for the production of white; as also touching the cause why a picture cast by glasses into a darkned room appears so distinct notwithstanding its irregular refractions. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 8: 6108-11, 1673. Reproduzido em: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978, pp.143-6. (NEWTON, 1673b)
49. NEWTON, Isaac. Carta para Lucas de 05/03/77, reproduzida em NEWTON, Isaac. *The correspondence of Isaac Newton*. Ed. H. W. Turnbull. 7 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977, vol. 2, pp. 245-61. (NEWTON 1677a)
- * 50. NUSSENZVEIG, H. Moysés. The theory of the rainbow. *Scientific American*. 236: (4) 116-27, 1977.
51. PARDIES, Ignace G. Some Animadversions on the theory of Light of Mr. Isaac Newton, Prof. of Mathematics in the University of Cambridge, printed in N°. 80. In a letter of April 9, 1672. N. S. from Ignatius Gaston Pardies, prof. of Mathematics in the Parisian College of Clermont. Translated from latin. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 7: 726-9, 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. 86-9. (PARDIES, 1672a)
52. PARDIES, Ignace G. A second letter of P. Pardies, written to the editor from Paris, May 21, 1672, to Mr. Newton's answer made to his first letter. Translated from the latin. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 7: 738-9, 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. 104-5. (PARDIES, 1672b)
53. PEDROSA, Israel. *Da cor à cor inexistente*. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, Léo Christiano Editorial Ltda, 1982.
- * 54. PUMFREY, Stephen. History of science in the National Science Curriculum: a critical review of resources and aims. *British Journal for the History of Science*, 24: 61-78, 1991.
55. REILLY, Conor. Francis Line, Peripatetic (1595-1675). *Osiris* 14: 222-53, 1692.
- * 56. ROGERS, P. J. Epistemology and history in the teaching of school science. *European Journal of Science Education* 4: 1-27, 1982.
57. RUSSELL, C. Whigs and professionals. *Nature* 308: 777-8, 1984.
58. SABRA, A. I. *Theories of light from Descartes to Newton*. London: Cambridge University Press, 1981.
59. SHAPIRO, Alan E. Newton's "achromatic" dispersion law: theoretical background and experimental evidence. *Archive for History of Exact Sciences* 21: 91-128, 1979.
60. SHAPIRO, Alan E. The evolving structure of Newton's theory of white light and color. *Isis* 71: 211-35, 1980.
61. SHIRLEY, J. W. An early experimental determination of Snell's law. *American Journal of Physics* 19: 507-8, 1951.

62. SIEGEL, Harvey. On the distortion of the history of science in science education. *Science Education* 63: 111-18, 1979.
63. *The compact edition of the Oxford English dictionary*. Oxford: Oxford University Press, 1985.
64. TIEMERSMA, Douwe. Methodological and theoretical aspects of Descartes's treatise on the rainbow. *Studies in History and Philosophy of Science* 19: 347-64, 1988.
65. TOPPER, David. Newton on the number of colours in the spectrum. *Studies in History and Philosophy of Science* 21: 269-79, 1990.
66. TOWNE, Dudley H., Teaching Newton's color theory firsthand. *American Journal of Physics* 61: 113-16, 1993.
67. WESTFALL, Richard S. Newton defends his first publication: the Newton-Lucas correspondence. *Isis* 57: 299-314, 1966.
68. WESTFALL, Richard S. *Never at rest, a biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.²

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

1. BECHLER, Zev. 'A less agreeable matter': The disagreeable case of Newton and achromatic refraction. *British Journal for the History of Science* 8: 101-26, 1975.
2. BLAY, Michel. La conceptualisation newtonienne des phénomènes de la couleur. Paris: Vrin, 1983.
3. BLAY, Michel. Christiaan Huygens et les phénomènes de la couleur. *Revue d'Histoire des Sciences* 37: 127-46, 1984.
4. BOHREN, Craig F.; FRASER, Alistair B. Newton's zero-order rainbow: unobservable or non-existent? *American Journal of Physics* 59: 325-6, 1991.
5. COHEN, I. B. Versions of Isaac Newton first published paper. *Archive Internationale d'Histoire des Sciences* 11: 357-75, 1958.
6. COHEN, I. B. Newton in the light of recent scholarship. *Isis* 51: 489-514, 1960.
7. COHEN, I. B. The first English version of Newton's *hypoteses non fingo*. *Isis* 52: 379-88, 1962.
8. EASTWOOD, Bruce Standfield. Descartes on refraction: Scientific versus rhetorical method. *Isis* 75: 481-502, 1984.
9. GALISON, Peter. Model and reality in Descartes's theory of light. *Synthese* 4 (4): 2-23, 1979.
10. GROSS, Allan G. On the shoulders of giants: seventeenth-century optics as an argument field. *Quarterly Journal of Speech* 74: 1-74, 1988.
11. GUERLAC, Henry. Can we date Newton's early experiments? *Isis* 74: 74-80, 1983.
12. HALL, A. Rupert. Further optical experiments of Isaac Newton. *Annals of Science* 11: 27-43, 1955.
13. HASHIMOTO, Takehiko. Huygens, dioptrics, and the improvement of telescope. *Historia Scientiarum* 37: 51-90, 1989.
14. HENDRY, John. Newton's theory of color. *Centaurus* 23: 230-51, 1989.

² Em português há uma tradução resumida desta biografia: *A vida de Isaac Newton*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1995.

15. LOHNE, Johannes A. Newton's table of refractive powers: origins, accuracy, and influence. *Sudhoffs Archiv* 61: 229-47, 1977.
16. LYMON, Ronald Newton's *experimentum crucis* and the logic of idealization and theory refutation. *Studies in the History and Philosophy of Science* 9: 51-7, 1978.
17. MARTINET, Monette. La théorie de la lumière selon Descartes. *Recherches sur le Dix-Septième Siècle* 1: 92-110, 1976.
18. MAULL, Nancy L. Cartesian optics and the geometrization of nature. *Review of Methaphysics* 32: 253-73, 1978.
19. MAUND, J. B. The nature of color. *History of Philosophy Quarterly* 8: 253-63, 1991.
20. MILLS, A. A. Newton's prism and his experiments on the spectrum. *Notes and Records of the Royal Society of London* 36: 13-36, 1981.
21. NAKAJIMA, Hideto. Two kinds of modification theory of light: Some new observations on the Newton-Hooke controversy of 1670 concerning the nature of light. *Annals of Science* 41: 261-78, 1984.
22. REINOLD, Anne. Lumière et la représentation de l'espace: Contribution picturale au débat philosophique du XVIIe siècle. *Recherches sur le Dix-Septième Siècle* 4: 7-19, 1980.
23. ROSENFELD, L. La théorie des couleurs de Newton et ses adversaires. *Isis* 9: 44-65, 1927
24. SAKELLARIADIS, Spyro. Descarte's experimental proof of the infinite velocity of light and Huygens rejoinder. *Archive for History of Exact Sciences* 26: 1-12, 1982.
25. SAKKOPOULOS, S. Newton's theory of fits of easy reflection and transmittion. *European Journal of Physics* 9: 123-6, 1988.
26. SHAPIRO, Alan E. Kinematic optics: A study of the wave theory of light in the seventeenth century. *Archive for History of Exact Sciences* 11: 134-266, 1973.
27. SHAPIRO, Alan E. Newton's definition of a light ray and the diffusion theories of chromatic dispersion. *Isis* 66: 194-210, 1975.
28. SHAPIRO, Alan E. Newton and Huygen's explanation of 22 degree halo. *Centaurus* 24: 273-87, 1980.
29. SHAPIRO, Alan E. Experiment and mathematics in Newton's theory of color. *Physics Today* 37 (9): 34-42, 1984.
30. SHAPIRO, Alan E. Huygen's *Traité de la Lumière* and Newton's *Opticks*: Pursuing and eschewing hypotheses. *Notes and Records of the Royal Society of London* 43: 223- 47, 1989.
31. SHAPIRO, Alan E. Comment on "Newton's zero-order rainbow: unobservable or nonexistent?" by C. F. Bohren and A. B. Fraser. *American Journal of Physics* 60: 749-50, 1992.
32. TIEMERSMA, Douwe. Methodological and theoretical aspects of Descarte's treatise on the rainbow. *Studies in the History and Philosophy of Science* 19: 347-64, 1988.
33. WESTFALL, Richard S. Newton and his critics on the nature of color. *Archive for History of Exact Sciences* 15: 47-58, 1962.
34. WESTFALL, Richard S. The development of Newton's theory of color. *Isis* 53: 339-58, 1962.
35. WESTFALL, Richard S. Newton's reply to Hooke and the theory of colors. *Isis* 54: 82-96, 1963.

36. WESTFALL, Richard S. Isaac Newton's coloured circles twixt two contiguous glasses. *Archive for History of Exact Sciences* 2: 181-96, 1965.
37. WHITESIDE, D. T. The expanding world of Newtonian research. *History of Science* 1: 16-29, 1962.
38. YOLDER, Joella. Christiaan Huygens great treasure. *Tractrix* 3: 1-13, 1991.
39. ZIGGELAAR, August. How did the wave theory of light take place in the mind of Christiaan Huygens? *Annals of Science* 37: 179-87, 1980.
40. ZIGGELAAR, August. The sine law of refraction derived from the principle of Fermat - prior to Fermat? The theses of Wilhem Boelmans, S. J., in 1634. *Centaurus* 24: 246-62, 1980.