

Este arquivo contém o texto completo do seguinte trabalho:

SILVA, Cibelle Celestino & MARTINS, Roberto de Andrade. O papel do experimento na óptica de Newton. [The role of experiment in Newton's optics]. Pp. 199-226, in: ALFONSO-GOLDFARB, Ana Maria & BELTRAN, Maria Helena Roxo (orgs.). *O saber fazer e seus muito saberes: experimentos, experiências e experimentações*. São Paulo: Editora Livraria da Física / EDUC / FAPESP, 2006.

Este arquivo foi copiado da biblioteca eletrônica do *Grupo de História e Teoria da Ciência* <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), do seguinte endereço eletrônico (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-119.pdf>>

Esta cópia eletrônica do trabalho acima mencionado está sendo fornecida para uso individual, para fins de pesquisa. É proibida a reprodução e fornecimento de cópias a outras pessoas. Os direitos autorais permanecem sob propriedade dos autores e das editoras das publicações originais.

This file contains the full text of the following paper:

SILVA, Cibelle Celestino & MARTINS, Roberto de Andrade. O papel do experimento na óptica de Newton. [The role of experiment in Newton's optics]. Pp. 199-226, in: ALFONSO-GOLDFARB, Ana Maria & BELTRAN, Maria Helena Roxo (orgs.). *O saber fazer e seus muito saberes: experimentos, experiências e experimentações*. São Paulo: Editora Livraria da Física / EDUC / FAPESP, 2006.

This file was downloaded from the electronic library of the *Group of History and Theory of Science* <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> of the State University of Campinas (UNICAMP), Brazil, from the following electronic address (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-119.pdf>>

This electronic copy of the aforementioned work is hereby provided for exclusive individual research use. The reproduction and forwarding of copies to third parties is hereby forbidden. Copyright of this work belongs to the authors and publishers of the original publication.

*O papel do experimento na óptica de Newton**

Cibelle Celestino Silva**
Roberto de Andrade Martins***

Introdução

As primeiras contribuições de Newton para a óptica – a descoberta da refração diferenciada sofrida por raios de cores diferentes e a teoria das cores – tornaram-no 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 Londres*.¹

* Apoio: CAPES e FAPESP.

** Professora do Instituto de Física de São Carlos, USP; Grupo de História e Teoria da Ciência, DRCC, Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Unicamp.

*** Professor do Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia do Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Grupo de História e Teoria da Ciência, Unicamp; professor colaborador do Programa de Estudos Pós-Graduados em História da Ciência, Centro Simão Mathias de Estudos em História da Ciência, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo.

¹ I. Newton, “A letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematics in the University of Cambridge; containing his new theory about light and colours; sent

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

O trabalho com óptica de Newton é famoso, por ser um exemplo do uso do método experimental, entre outras coisas. Newton apresentou uma grande variedade de experimentos descritos com cuidado e clareza, para provar uma mesma proposição. Essa multiplicidade de experimentos, inventados e aperfeiçoados ao longo dos anos, mostra o resultado do seu amadurecimento e também o efeito das críticas que ele recebeu. É exatamente esse excesso de cuidado experimental que tornaria seu trabalho final sobre óptica, o *Opticks*, extremamente claro e interessante para o público em geral. Neste trabalho vamos analisar o que há de verdade nesse tipo de afirmação.

Faremos aqui uma análise dos experimentos para justificar algumas proposições estabelecidas no Livro I do *Opticks*² que são centrais na teoria newtoniana de luz e cores – a refrangibilidade dos raios, a relação entre cor e refrangibilidade, a imutabilidade dos raios de luz, composição da luz branca e outros. Isso será feito através do

by 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), pp. 3075-87; traduzido em C. C. Silva & R. de A. Martins, "A 'Nova teoria sobre luz e cores' de Isaac Newton: uma tradução comentada", *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 18 (4), pp. 313-27.

2 *Idem*, *Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflexions and colours of light*; neste trabalho vamos nos referir a essa obra como *Opticks*.

estudo crítico do *Opticks*, comparando seu conteúdo com o artigo de 1672, com os vários manuscritos newtonianos editados e sua correspondência sobre óptica.

A prova por experimentos

O método utilizado no *Opticks* baseia-se, principalmente, em experimentos. Após cada proposição, 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 etc. Ao longo da obra, há um enorme número de experimentos que vão se reforçando e produzindo uma forte base para sua teoria. 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.³

Não é recomendável considerar um único experimento ou observação 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.

Newton afirmou várias vezes que desenvolveu sua teoria sobre luz e cores com base em fenômenos observados experimentalmente ou em princípios deles deduzidos, sem nenhuma hipótese sobre suas cau-

3 E. Mach, *Knowledge and error*, pp. 89-90.

sas; tanto que, na introdução do *Opticks*, anunciou: "Meu desejo neste Livro não é explicar as propriedades da Luz através de Hipóteses, mas sim propor e prová-las pela razão e experimentos".⁴ No entanto, Newton utilizou hipóteses em muitas partes de seu trabalho; no caso da óptica, trabalhou com hipóteses como a existência de corpúsculos de luz e de um éter luminoso vibrante. Neste artigo, discutiremos em detalhes os fatores que o levaram a utilizar, além de experimentos, *idealização de situações experimentais e argumentos metodológicos* para decidir entre duas explicações diferentes para a formação do espectro colorido quando a luz branca atravessa um prisma.

O esclarecimento do contexto histórico no qual se deu a formulação da teoria óptica de Newton, sobretudo seu aspecto controverso e contestatório, nos dá uma compreensão mais segura da gênese e do desenvolvimento dessa teoria. Esse esclarecimento evita a concepção errônea de que grandes teorias científicas brotam completas da mente de gênios através de indução de resultados experimentais somente.

Os trabalhos ópticos de Newton

Os primeiros experimentos que Newton fez com prismas e as primeiras tentativas de explicar os fenômenos observados podem ser encontrados no ensaio de 1666, *Of Colours*, que não foi publicado na época.⁵ Esse ensaio contém o primeiro registro de suas observações 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. Esses e vários outros experimentos não

4 Sobre o uso de hipóteses por Newton no *Principia*, veja A. Koyré, *Études Newtoniennes*, pp. 28-40. Sobre o uso de hipóteses no *Opticks* veja A. F. Shapiro, "Newton's optics and atomism" in I. B. Cohen & G. E. Smith, orgs., *The Cambridge companion to Newton*, pp. 227-55.

5 Várias anotações de Newton, bem como o ensaio *Of Colours* foram publicados em J. E. McGuire & M. Tamny, *Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook*. Neste artigo, essa obra será citada como *Notebook*.

estão expostos no *Of Colours* com o mesmo rigor geométrico com que estão presentes em suas *Optical Lectures*. Esta obra engloba um conjunto de aulas dadas por Newton entre 1670 e 1672, em Cambridge, intitulado *Optica*. Há também uma versão menor, intitulada *Lectures Opticae*.⁶ 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*.

Uma breve comparação entre as obras *Optical Lectures* e *Opticks* mostra-nos 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 ao final do livro (adicionadas a partir da segunda edição, em 1717) que discutem questões polêmicas como, por exemplo, a existência de corpúsculos de luz e forças à distância. O que as torna radicalmente diferentes é a maneira como a teoria é apresentada: as pesadas demonstrações geométricas presentes nas *Optical Lectures* não aparecem no *Opticks*.

No entanto, como o próprio Newton informou em 1672, ele não foi o primeiro a observar as cores produzidas por um prisma. De fato, 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).

6 Neste artigo, essa obra será citada como *Optical Lectures*. Ambas estão publicadas e traduzidas, I. Newton, *The Optical papers of Isaac Newton*.

Koyré comparou a estrutura dos experimentos de Newton com os experimentos de Boyle e Hooke que, um pouco antes, também tinham estudado o “célebre fenômeno das cores”. A diferença principal é que Newton faz *medidas*, enquanto Boyle e Hooke, não. Eles *descrevem* fenômenos como a formação de cores por um prisma, as cores de penas de pássaros, metais, bolhas de sabão, etc. Newton, por outro lado, não apenas descreve os fenômenos, mas mede a posição das cores no espectro, as distâncias entre as cores nos “anéis de Newton”, etc.⁷

A teoria newtoniana sobre luz e cores

Quando um feixe de luz branca incide num anteparo, após passar por um prisma, podemos observar sobre esse 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 procurou fundamentar a “demonstração” da composição da luz branca com seu *Experimentum Crucis*. Nesse experimento, a luz solar passa por um prisma e seu espectro colorido incide num anteparo com um pequeno furo, que permite a passagem de um feixe de luz de uma única cor; esse feixe atravessa um segundo prisma e, após ser refratado por ele, incide num segundo anteparo. Girando o primeiro prisma, é 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 sofriam desvios de ângulos diferentes.

Esses dois experimentos podem parecer conclusivos, mas há várias dificuldades no estabelecimento da teoria de Newton.

7 A. Koyré, *op. cit.*, p. 42.

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 *separadas* pelo prisma. Na primeira hipótese, 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 refrangibilidades,⁸ 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 responder a essas perguntas, vamos analisar algumas proposições do *Opticks* e outros trabalhos de Newton.

Proposição I: Luzes que diferem em Cor também diferem em Graus de Refrangibilidade

Essa proposição é fundamental para toda a teoria desenvolvida no *Opticks*, pois todas as proposições seguintes estão nela baseadas.

8 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 I. Newton, *Opticks*, p. 2.

Newton apresentou dois experimentos para demonstrá-la. No primeiro deles (Figura 1), observou através de um prisma um pedaço de papel preto dividido em duas partes, uma pintada de vermelho e outra de azul. A parte pintada de vermelho parecia separada da azul quando o papel era iluminado pela luz da janela e observado através do prisma; girando o prisma em torno de seu eixo para cima, a parte azul parecia subir mais que a vermelha e, girando para baixo, a azul parecia descer mais que a vermelha. Newton conclui:

(...) 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 refringível.⁹

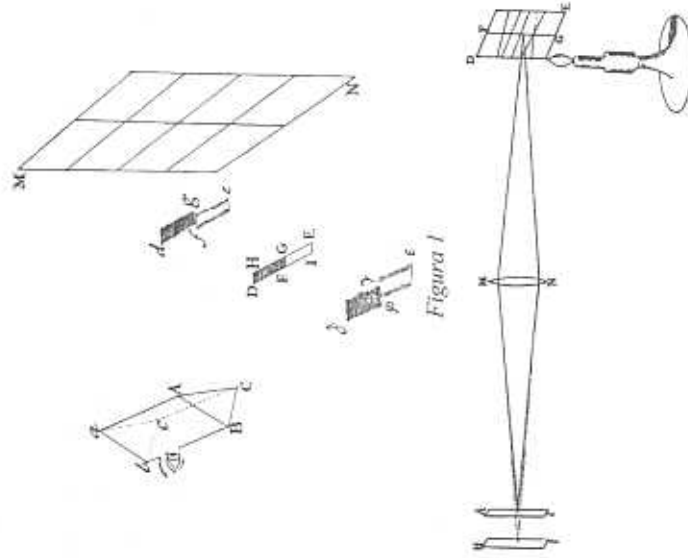


Figura 1

No segundo experimento (Figura 2), enrolou um pedaço de fio preto no papel azul e vermelho e iluminou o conjunto com uma vela, formando uma imagem com uma lente. Percebeu que não era possível focalizar as duas partes simultaneamente. Isso queria dizer que a distância focal da lente dependia da cor utilizada, sendo (no caso) maior para o vermelho do que para o azul. Se a distância focal muda com a cor, isso significa que cada cor sofre uma refração diferente. 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.

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

Proposição II: a luz do Sol consiste em Raios com diferentes Refrangibilidades

Essa é a proposição mais importante da teoria de Newton sobre as cores e foi justificada por experimentos que 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 propõem provar; isto é, não provam que a *luz solar* é uma mistura de raios; eles provam apenas que os raios que compõem o espectro formado pela luz solar *após ela passar pelo prisma* são refratados de quantidades diferentes.

O Experimento 3 do *Opticks* é igual ao primeiro, apresentado em 1672, no qual 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”.¹⁰ Essa é a “posição de desvio mínimo”.¹¹ 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. É possível provar que, quando o prisma está ajustado nessa posição, a imagem formada por um feixe de luz monocromático é circular.¹²

A figura 3 mostra o feixe de luz solar refratado incidindo perpendicularmente na parede oposta do quarto formando uma mancha alongada e colorida.

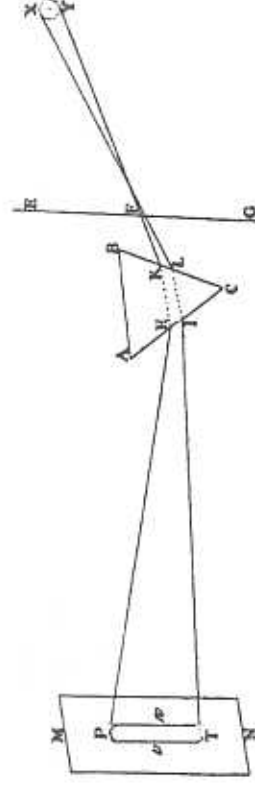


Figura 3

Usando um prisma de 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, e o comprimento da imagem correspondeu a 101/4 polegadas, ou seja, a imagem formada

10 *Ibid.*, p. 28.

11 Vários livros-texto atuais discutem sobre a posição de desvio mínimo. Veja por exemplo, M. Alonso & E. J. Finn, *Física: um curso universitário*, pp. 407-8.

12 A demonstração de Newton pode ser encontrada em I. Newton, *The Optical Lectures*, p. 273.

não era circular. Assim, os fatos experimentais estão em desacordo com a teoria de refração aceita.

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 (raios violeta) sofreram a maior refração e os que foram para a parte inferior T (raios vermelhos), a menor.

Mas não era possível concluir apenas isso, pois, na época, existiam outras explicações possíveis. De fato, tanto Newton quanto seus contemporâneos (Pardies, Hooke, Huygens, etc.) sugeriram várias explicações para esse efeito. No artigo de 1672, Newton explorou algumas possibilidades. Ele testou se a forma alongada da mancha poderia ter sido causada pelas diferentes espessuras do prisma, pelo tamanho do buraco da janela ou pela localização do prisma (dentro ou fora da sala).¹³ Em todas essas variações, a mancha permanecia alongada. Ao discutir o experimento 5 em *Opticks*, Newton comentou:

Então, por esses dois experimentos, aparece que em incidências iguais, há refrações diferentes. Mas de onde esta diferença surge, se é por que alguns raios são mais refratados, e outros menos constantemente ou por acaso, ou se um mesmo raio é perturbado pela refração, dilatado, e como se fosse partido e dilatado em muitos raios divergentes, como Grimaldi¹⁴ supõe, não surge ainda deste experimento, mas aparecerá pelos seguintes.

13 Sobre as modificações de Newton do primeiro experimento, veja M. Mamiani, *Isaac Newton filosofo delle natura: Le lezioni giovanili di ottica e la genesi del metodo newtoniano*.

14 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 A. R. Hall, “Beyond the fringe: diffraction as seen by Grimaldi, Fabri, Hooke and Newton”, *Notes and Records of the Royal Society*, 41, pp. 111-43.

Após essa observação, Newton apresentou seis experimentos, acompanhados por muitas variações e comentários, antes de concluir a prova de sua proposição.¹⁵ Portanto, vemos claramente que ele mesmo percebeu que seu primeiro experimento não era suficiente para provar que a luz do sol consiste em "raios com diferentes refrangibilidades". Após eliminar várias explicações alternativas, Newton apresentou um importante experimento. Ele o chamou de *Experimentum Crucis* – uma referência óbvia a Francis Bacon – e provavelmente o considerou decisivo.¹⁶ Mas antes de discutirmos o *Experimentum Crucis*, vamos ainda discutir outros aspectos relevantes do procedimento experimental de Newton.

Um experimento difícil de ser realizado

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

15 I. Newton, "A letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; containing his new theory about light and colours; sent by 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), pp. 59-76.

16 O uso da expressão "*experimentum crucis*" para designar um experimento decisivo é devido à influência da obra *Novum Organon* de Francis Bacon (F. Bacon, *Novum Organon*, II, XXXV). Bacon usa a expressão *instantiae crucis* como uma situação crucial na qual se deve 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 crucis*. Newton usa o termo empregado por Hooke, provavelmente sob influência de sua leitura da *Micrographia*. Sobre o papel do termo *experimentum crucis* para Bacon, Hooke e Newton, veja J. A. Lohr, "Experimentum Crucis", *Notes and Records of the Royal Society*, 23, pp. 169-99. Sobre a relação entre Newton e Bacon, ver: A. Koyré, *op. cit.*

a parede da sala escura perpendicularmente, pois a incidência normal resulta na formação de uma imagem alongada, independentemente de a luz ser monocromática ou não.

Em todos os esquemas feitos por Newton para representar esse experimento, a luz atinge a parede perpendicularmente após atravessar o prisma. 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 $44^{\circ}56'$, como mostrado na Figura 4. Há, no entanto, um problema na realização do experimento com os mesmos ângulos usados por Newton, mesmo para alguém que esteja em Cambridge.

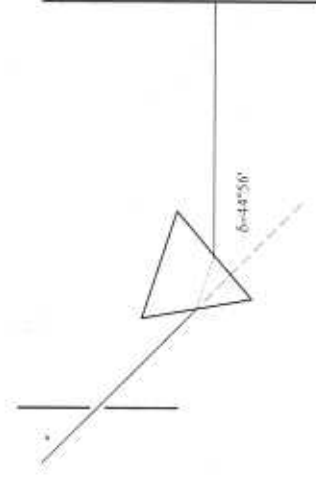


Figura 4

No começo do ano de 1666, na Inglaterra, 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) 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).

Newton apresentou uma outra sugestão para resolver o problema da incidência normal do feixe refletido. Numa versão mais antiga do experimento¹⁷ 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 medições necessárias nesse caso. Embora Newton não tenha discutido os detalhes e as 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 ele 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.

O instrumento usado por Newton em suas medidas era, segundo Lohne,¹⁸ o mostrado na Figura 5. 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 ele tenha 20cm de raio e que seja possível ter uma precisão de

17 I. Newton, *Optical Lectures*, p. 53.

18 J. A. Lohne, "Isaac Newton: the rise of a scientist, 1661 – 1671", *Notes and records of the Royal Society*, 20, pp. 125-39.

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 imensas. Para realizar as medidas, ele 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.

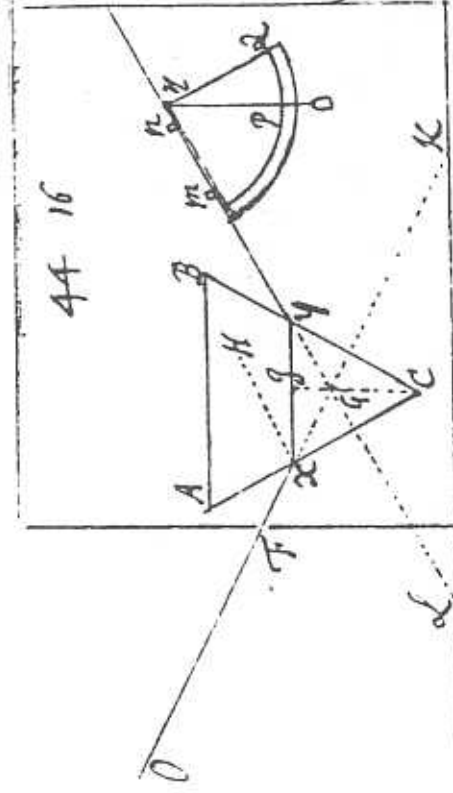


Figura 5

Um outro indicio 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 régua e indicando valores com precisão de $1/8$ de polegada que, como todos sabem, é compatível com esse tipo de medida.¹⁹ Ele

19 I. Newton, *Notebook*, pp. 468-69.

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 ($62,5^\circ$) com uma precisão aceitável da ordem de grau e não de minuto, como fez em 1672.

A idealização da forma do espectro observado

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 (...)"²⁰

Além da questão da incidência normal do feixe refratado sobre o anteparo, há também a questão de nitidez do espectro descrito por Newton, que também vale a pena ser discutida, pois fica claro que ele idealizou certos resultados experimentais baseados em suas expectativas teóricas.

20 *Idem*, *Opticks*, pp. 28-9.

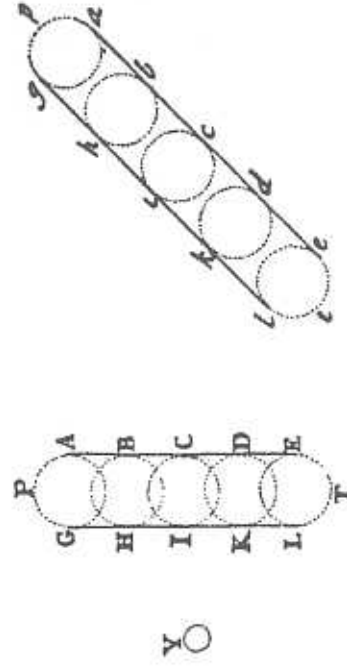


Figura 6

De acordo com o diagrama do *Opticks* mostrado na Figura 6, Newton descreveu o espectro solar como formado por círculos coloridos sobrepostos, cujos centros estão distribuídos ao longo de uma linha reta perpendicular ao eixo do prisma.²¹ Uma extremidade é formada por uma imagem circular da cor violeta, a outra formada por uma imagem vermelha e a região intermediária é 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?

A aparência do espectro descrita por Newton foi criticada por Francis Linus, em uma carta de 25 de fevereiro de 1675, na qual 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".²²

21 *Ibid.*, p. 39.

22 F. Linus, "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. way of answer to a former letter of the same Mr. Linus, concerning Mr. Isaac Newton's theory of

Como aponta Kuhn,²³ 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 o violeta na região penumbral, além disso, o olho é mais sensível para a região amarela do espectro. 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 solar.

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.

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 ele não se restringia apenas às observações experimentais e fazia extrapolações matemáticas dos resultados experimentais baseado em hipóteses.²⁴

O Experimentum Crucis

Após a discussão de alguns problemas do Experimento 3, vê-se que o resultado obtido (forma oblonga da imagem) não está de acordo com as leis aceitas da refração. Esse experimento só permite

light and colours", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 10 (1675), pp. 499-501, in I. B. Cohen & R. E. Schofield, eds., *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*, pp. 151-2, p. 151.

23 I. B. Cohen & R. E. Schofield, *op cit*, p. 34.

24 *Ibid*, p. 35.

concluir que há uma diferença na refração sofrida pelos raios após serem refratados pela primeira face BC do prisma da Figura 3, 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, como mostrado na Figura 7.

Nesse experimento, um feixe de luz solar passa através de um primeiro prisma e atinge um anteparo com um pequeno furo, de modo que uma pequena parte do espectro (uma única cor) passe através dele. Esse feixe secundário atinge um segundo prisma. Newton observou que o segundo prisma não mudava a cor do feixe secundário, notando também que cores diferentes sofriam deflexões diferentes no segundo prisma: a luz vermelha, novamente, sofria o menor desvio e a violeta, o maior.

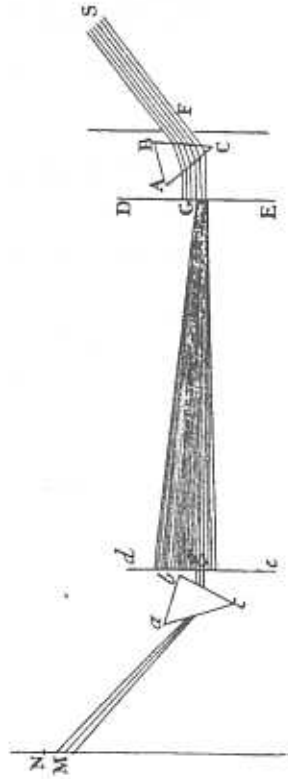


Figura 7

Na verdade, esse experimento não prova as duas proposições acima. 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.

Afinal, o que esse experimento mostra? Segundo Sabra, ele prova 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.²⁵

Em 1672, Newton chamou esse experimento de *Experimentum Crucis*, pois para ele esse 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. Já no *Opticks*, amenizou a importância desse experimento em relação ao de 1672. Aqui, o papel de provar que a luz branca é uma mistura de raios é colocada discretamente. Newton não atribuiu a ele um papel especial: é mais um experimento dentre outros.

Através da variedade de circunstâncias experimentais, Newton procurou reforçar a conclusão central – composição da luz solar. 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? Veremos, a seguir, que essa questão é um dos pontos fracos do uso do “método newtoniano” na teoria das cores de Newton.

O uso de argumentos epistemológicos por Newton

Para entendermos todos os aspectos envolvidos na argumentação de Newton, é importante compreendermos sua distinção teórica entre cor simples (ou primária) e cor composta. Nossos olhos não podem distinguir entre os dois tipos de luz. No entanto, elas podem ser distinguidas através de experimentos: a luz composta pode ser decomposta em dois ou mais componentes por um prisma, enquanto

que a luz primária, não. Segue dessa *definição* que a luz branca não é simples – ela é composta, pois pode ser decomposta em várias cores diferentes por um prisma. Uma outra parte importante da argumentação de Newton pode ser vista em seus esforços para mostrar que as cores espectrais não podem ser transformadas em cores diferentes – isto é, as cores espectrais são “imutáveis”.²⁶ Dessa forma, segue da *definição* de cores simples e compostas e da imutabilidade das cores espectrais que a luz branca é composta; então, *apenas um experimento* – a “decomposição” da luz branca por um prisma – é suficiente para provar que a luz branca é composta.

Quando Newton publicou seus estudos sobre luz e cores, a obra *Micrographia*, de Hooke (publicada em 1665), era um trabalho influente.²⁷ Hooke defendia que a luz branca era um tipo simples de vibração não periódica e a luz colorida era uma modificação adquirida da luz branca ao ser refratada obliquamente.²⁸ Aceitar a heterogeneidade da luz branca implica aceitar que as cores estão presentes nela independentemente de sua passagem por um meio refrator. Hooke achava desnecessário supor que os movimentos diferentes que caracterizam os raios de cores distintas já estivessem presentes na luz branca.

No artigo de 1672, Newton apresentou apenas um experimento para mostrar que era possível recompor a luz branca utilizando uma lente convergente. No *Opticks*, após as discussões com Hooke, apresentou vários experimentos combinando em uma grande variedade de montagens diferentes para produzir novamente luz branca, *visivelmente* igual à luz solar.

26 Para mais detalhes sobre como Newton sustentou experimentalmente essas definições, veja R. A. Martins & C. C. Silva, “Newton and colour: the complex interplay of theory and experiment”, *Science & Education*, 10 (3), pp. 287-305.

27 R. Hooke, *Micrographia or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon*.

28 Para mais detalhes sobre a teoria das cores de Hooke, veja, por exemplo, C. C. Silva, “A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke”, in *Atas do V Seminário Nacional da Ciência e da Tecnologia*, pp. 348-60.

25 A. I. Sabra, *Theories of light from Descartes to Newton*, p. 295.

Como exemplo, vejamos o Experimento 10. 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 1672²⁹ com o objetivo de mostrar que, quando os raios se cruzam, não destroem os efeitos ou propriedades adquiridas pela refração.

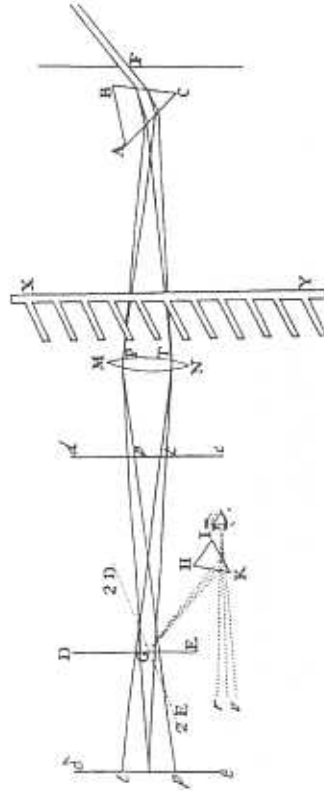


Figura 8

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. Interceptando uma das cores antes da lente, viu que ela também desaparecia no papel colocado em G 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. Numa outra etapa do experimento, Newton movimentou o pente rapidamente, observando a cor branca em G, explicada como uma sensação causada pela rápida sucessão de cores que daria a impressão de uma mistura homogênea.

29 I. Newton, "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 (1672), pp. 5084-103, in I. B. Cohen & R. E. Schofield, orgs., *op. cit.*, pp. 129-31.

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.

No entanto, nem esse experimento nem o *Experimentum Crucis* provaram que essa luz resultante era realmente igual à luz solar. Newton já havia se deparado com esse problema em suas discussões com Hooke. Poderia ser – como Hooke acreditava – que o meio refrator produzisse mudanças no feixe de luz branca que permaneceriam inalteradas nas refrações subsequentes. De fato, é impossível saber se as cores estão presentes na luz branca ou não, antes de ela ser refratada ao menos uma vez. É possível sustentar que as diferentes modificações da luz branca (as diferentes cores) poderiam se combinar pela compensação mútua de suas diferenças para produzir outro tipo de luz branca. Em todos os experimentos de Newton, a luz é refratada ao menos uma vez. Poderia acontecer que o meio refrator agisse sobre a luz mudando-a, de modo que todas as modificações permanecessem imutáveis nas refrações subsequentes.

Sendo assim, a escolha entre a teoria newtoniana e a teoria modificada não pode ser feita apenas através de experimentos. Newton percebeu que a escolha entre as duas hipóteses deveria ser feita com base em argumentos metodológicos e não apenas utilizando resultados experimentais. Em sua resposta para Hooke, disse: "Eu não vejo razão para suspeitar que os mesmos *Phenomena* possam ter outras causas ao ar livre"³⁰, 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. Essa 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

30 *Ibid.*, p. 134.

nas “Regras de filosofar” do Livro III dos *Principia*.³¹ 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 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 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

Neste trabalho, fizemos uma análise da estrutura, das proposições e dos experimentos do Livro I do *Opticks*, publicado em 1704 – quase quarenta anos após o início das pesquisas de Newton sobre óptica. Esse estudo foi feito à luz de seus escritos mais antigos sobre óptica, nos quais já existem vários aspectos de sua teoria sobre luz e cores.

O trabalho óptico de Newton é conhecido como um exemplo de rigor experimental e também como um exemplo do uso do método indutivista na ciência. No entanto, neste trabalho apresentamos alguns questionamentos sobre essas idéias. Inicialmente, discutimos alguns problemas relacionados com a reprodução de um dos experimentos-chave para sua argumentação (Experimento 3). Em seu artigo de 1672, Newton apresentou uma montagem experimental muito difícil de ser reproduzida. Ela exigia que, ao mesmo tempo, o prisma estivesse ajustado na posição de desvio mínimo e também que os raios refratados

incidissem perpendicularmente sobre uma parede. Vimos, porém, que é muito difícil satisfazer ambas as condições, pois a posição do Sol está sempre variando.

Como sua narrativa não coincide com as condições experimentais descritas em 1672, levantamos a hipótese de Newton ter calculado os valores do ângulo de deflexão e do comprimento angular da imagem a partir do índice de refração do vidro e do ângulo vertical do prisma. Apresentamos dois argumentos a favor dessa hipótese: o fato de a precisão das medidas apresentada por Newton (1° de arco) ser muito grande para o tipo de instrumento usado nas medidas e também o fato de ele não ter apresentado medidas angulares nos experimentos anteriores descritos no *Notebook* e, tampouco, nos experimentos posteriores descritos no *Opticks*.

Além de observações diretas, Newton também lançou mão de uma idealização feita a partir do esperado teoricamente sobre a forma do espectro observada – laterais retilíneas e finais semicirculares. É muito improvável que ele 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.

O papel atribuído por Newton a certos experimentos modificou-se com a passar do tempo, como, por exemplo, o do Experimento 6. 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. No *Opticks*, ele teve sua importância diminuída – é mais um entre vários outros experimentos.

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.

31 Veja A. Koyré, I. B. Cohen & A. Whitman, *Isaac Newton's philosophiæ naturalis principia mathematica, third edition (1726) with variant readings*, Vol. 2, pp. 550-6.

nado: 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?

Newton percebeu que a escolha entre as duas hipóteses deveria ser feita baseada em *argumentos metodológicos e não apenas experimentais*. 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 devem multiplicar as entidades sem necessidade: deve-se escolher a teoria mais simples. Essa é a regra metodológica conhecida como *Navalha de Occam*.

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 ideia de que apenas os experimentos são necessários para se fundamentar uma nova teoria. 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 idealização dos resultados experimentais baseada em previsões teóricas e argumentos metodológicos para estabelecer certos pontos conflitantes de sua teoria.

Bibliografia

- ALONSO, M. & E. J. Finn. *Física: um curso universitário*. São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1972.
- BACON, F. *Novum Organon*. São Paulo, Abril Cultural, 1972.
- COHEN, I. B. & R. E. Schofield, orgs. *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1978.
- COHEN, I. B. & G. E. Smith, orgs. *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge, Cambridge University Press, 2002.
- HALL, A. R. "Beyond the fringe: diffraction as seen by Grimaldi, Fabri, Hooke and Newton". *Notes and Records of the Royal Society*, 41 (1987): 111-43.
- HOOKE, R. *Micrographia or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquires thereupon*. Londres, J. Martyn and J. Allestry, 1665; reimpressão. Nova Iorque, Dover, 1961.
- KOYRÉ, A. *Études Newtoniennes*. Paris, Gallimard, 1965.
- KOYRÉ, A. & I. B. Cohen, A. Whitman. *Isaac Newton's Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, third edition (1726) with variant readings*. Cambridge, Cambridge University Press, 1972, 2 vols.
- LOHNE, J. A. "Isaac Newton: the rise of a scientist, 1661-1671". *Notes and Records of the Royal Society*, 20 (1965): 125-39.
- . "Experimentum Crucis". *Notes and Records of the Royal Society*, 23 (1968): 169-99.
- MACH, E. *Knowledge and error*. Dordrecht, D. Reidel, 1976.
- MAMIANI, M. *Isaac Newton filosofo della natura: Le lezioni giovanili di ottica e la genesi del metodo newtoniano*. Florença, La Nuova Italia Editrice, 1976.
- MARTINS, R. de A. & C. C. Silva. "Newton and colour: the complex interplay of theory and experiment". *Science & Education*, 10 (3, 2001): 287-305.
- MCGUIRRE, J. E. & M. Tamny. *Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook*. Cambridge, Cambridge University Press, 1983.
- NEWTON, I. "A letter of Mr. Isaac Newton, professor of the Mathematics in the University of Cambridge; containing his new theory about light and colors; sent by the author to the publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72; in order to be communicated to the R. Society". *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 80 (1672): 3075-87.

- NEWTON, I. *Opticks or, a treatise of the reflections, refractions, inflexions and colours of light*. London, 1704; reimpressão. Nova Iorque, Dover, 1952.
- _____. *Óptica*. Trad. de A. K. Assis. São Paulo, Edusp, 1996.
- _____. *The optical papers of Isaac Newton*. Org. de A. E. Shapiro. Cambridge, Cambridge University Press, 1984.
- SABRA, A. I. *Theories of light from Descartes to Newton*. Londres, Cambridge University Press, 1981.
- SILVA, C. C. "A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke". *Atas do V Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia*. São Paulo, Sociedade Brasileira de História da Ciência, 1998.
- SILVA, C. C. & R. de A. Martins. A "Nova teoria sobre luz e cores" de Isaac Newton: uma tradução comentada. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 18 (4, 1996): 313-27.