

OS ‘ESTADOS DE FÁCIL TRANSMISSÃO E FÁCIL REFLEXÃO’ DE ISAAC NEWTON: MODELOS E CONTRADIÇÕES

Cibelle Celestino Silva¹, Breno Arsioli Moura²

RESUMO

Para explicar a formação e a periodicidade encontrada nos anéis coloridos que se formam em uma película fina, Newton desenvolveu o conceito de “estados” de fácil transmissão e fácil reflexão, em que o raio de luz estaria disposto a ser transmitido ou refletido pela superfície. Para Newton não estava completamente claro o que seriam os estados de fácil transmissão e de fácil reflexão e tampouco suas causas. Mesmo dizendo que não se comprometeria com a origem dos “estados” e não elaboraria hipóteses em sua ciência, Newton discutiu diferentes possibilidades para explicar a origem dos estados. Este artigo discute os diferentes modelos desenvolvidos por Newton para explicar os “estados”, bem como os seus limites, contradições e o uso de hipóteses no desenvolvimento destes modelos.

Palavras-chave: Isaac Newton, óptica, estados da luz, interferência, hipóteses.

THE ISAAC NEWTON’S FITS OF EASY TRANSMISSION AND EASY REFLECTION: MODELS AND CONTRADICTIONS

Newton developed the concept of fits of easy transmission and easy reflection in order to explain the periodicity of colored rings in thin films. The fits are dispositions of the light rays to be reflected or refracted by the surface. Newton was not sure about the fits’ properties and their origin. Despite the fact Newton stated he would not consider the origin of the fits in order to avoid non-empirical hypothesis in his science, he took into account many different explanations for the fits. The present paper discusses the various models developed by Newton to explain the colours in thin plates, emphasizing their limits, contradictions and their hypothetical character.

Kew-words: Isaac Newton, optic, fits of light, interference, hypothesis.

¹ Professora doutora do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, campus de São Carlos.
E-mail: cibelle@ifsc.usp.sbr

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação interunidades em ensino de ciências da Universidade de São Paulo.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse por parte de alguns historiadores da ciência por aspectos pouco explorados da obra de Isaac Newton, particularmente aqueles que não fazem parte do conhecimento científico aceito como “correto” atualmente (Buchwald & Cohen, 2001). Entre estes últimos, podemos incluir o conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão desenvolvido por Newton para explicar o surgimento de anéis coloridos entre duas superfícies, atualmente conhecidos por "anéis de Newton", em homenagem aos estudos do cientista sobre esse fenômeno.

Segundo Newton, os estados seriam uma das propriedades originais da luz e fariam com que os raios, dependendo do estado em que estivessem, de fácil reflexão ou de fácil transmissão, fossem respectivamente refletidos ou transmitidos por um corpo.

Aspectos metodológicos e epistemológicos também têm recebido bastante atenção por parte dos estudiosos da obra de Newton (Cohen & Smith, 2002). Entre esses aspectos, podemos citar o papel das hipóteses no desenvolvimento da ciência newtoniana. Segundo Alan Shapiro (2002), para Newton, as hipóteses não desempenharam um papel essencial ou necessário em sua ciência, particularmente na óptica, apesar de elas terem sido usadas em seus trabalhos privados e não publicados para desenvolver teorias e prever novas propriedades (Shapiro, 2002, p. 228). No entanto, ao estudarmos em detalhes o desenvolvimento do conceito dos estados da luz de Newton, vimos que as hipóteses aparecem tanto nos trabalhos de caráter privativo quanto nos trabalhos publicados, embora de forma não explícita.

Os “estados da luz” se inserem em um projeto maior de Newton. Sua intenção era desenvolver uma única teoria para explicar os vários fenômenos ópticos conhecidos na época. Isso aparece explicitamente no *Opticks*, onde ele relaciona resultados que tratam principalmente da composição da luz branca e das cores dos objetos com suas explicações para a refração, reflexão e cores em películas finas, usando os estados da luz como elemento unificador.

O presente artigo analisa criticamente como Newton desenvolveu o conceito de estados da luz ao longo dos anos até chegar a sua forma final publicada em 1704 em seu livro *Opticks*, mostrando que esta tarefa não foi simples. Newton viu-se obrigado a utilizar vários argumentos não empíricos em sua obra e enfrentou grandes problemas conceituais em sua tentativa de construir uma teoria única sobre a natureza da luz e sua interação com os corpos materiais.

OS ESTUDOS DE BOYLE E HOOKE

Os estudos de Newton sobre luz e cores em geral e sobre a formação dos anéis de cores, em particular, foram muito influenciados pelos trabalhos de Robert

Boyle [1624-1691] e Robert Hooke [1635-1703]. A obra de Boyle *Experiments and considerations touching colours*³, foi de grande relevância para os estudos iniciais de Newton sobre óptica. O livro de Boyle não tratava exatamente da óptica em si, mas da relação entre a matéria e suas propriedades ópticas, incluindo a cor. Os químicos da época acreditavam que as cores eram causadas pela presença de elementos de enxofre, mercúrio ou sal nos corpos, idéia que Boyle refutava. Ele acreditava que as cores dos corpos não eram qualidades deles, mas produzidas pela refração e reflexão dos raios de luz, ponto em que Newton concordava. Um dos aspectos da teoria de Boyle rejeitado por Newton foi a idéia de que a luz colorida era luz branca modificada de alguma maneira pelo corpo (Hall, 1993).

Hooke, por sua vez, foi o primeiro a apresentar um estudo sistemático sobre a formação de cores em películas finas. Realizou vários experimentos com mica, líquidos de vários tipos pressionados entre duas lâminas de vidro comum, bolhas e superfícies de metais, chamando o sistema de cores de *anéis* ou *íris*. Ironicamente, esse fenômeno é conhecido atualmente por "anéis de Newton".

As principais idéias de Hooke sobre a natureza da luz e a formação das cores eram que a luz seria um tipo de movimento vibratório no éter; as cores seriam modificações da luz branca; e que só existiriam duas cores básicas ou primárias, o azul e o vermelho, sendo as outras cores misturas de azul e vermelho em proporções diferentes. Hooke explicou a formação de cores entre duas superfícies como sendo o resultado da mistura entre os pulsos de luz refletidos pela primeira superfície e os refratados pela primeira e refletidos pela segunda. Newton rejeitou todas estas idéias (Martins & Silva, 2001).

Embora para Hooke a luz não fosse uma onda (era uma sucessão não periódica de pulsos), suas investigações sobre a luz representaram uma transição do sistema cartesiano para um desenvolvimento maior da teoria ondulatória (Whittaker, 1983). Hooke conseguiu sistematizar e aplicar um conjunto de explicações baseadas na concepção ondulatória para a luz satisfatoriamente, explicando os mais diversos fenômenos ópticos como a refração, a reflexão e os anéis de cores em filmes finos.

Segundo Sabra (1981), um dos pontos fracos do trabalho de Hooke foi não ter conseguido medir a espessura dos filmes, deixando sua teoria com um aspecto mais qualitativo que quantitativo. Foi aqui que Newton obteve avanços em seus estudos sobre as cores em filmes finos. Do ponto de vista historiográfico, no entanto, é importante destacarmos que a descoberta da periodicidade no aparecimento dos anéis luminosos é de Hooke e seus experimentos são muito instrutivos e sua explicação para o fenômeno está longe de ser absurda.

³ Título inteiro: *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.*

OS "ANÉIS DE NEWTON" ANTES DO *OPTICKS*

As primeiras experiências de Newton relacionadas à formação de anéis coloridos entre duas superfícies transparentes estão descritas no ensaio *Of colours*, de 1666 e não publicado na época (McGuirre & Tamny, 1983). Para observar os anéis coloridos, Newton utilizou inicialmente dois prismas pressionados um contra o outro, como mostra a Figura 1.

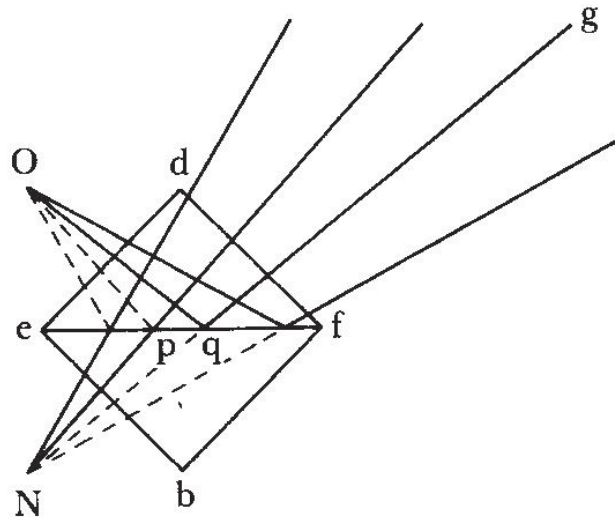


Figura 1 - Experimento feito por Newton para a visualização dos anéis coloridos (McGuirre & Tamny, 1983, p. 472).

Foi nesse ensaio que Newton começou a investigar sistematicamente o fenômeno das cores, discutindo a heterogeneidade dos raios coloridos, baseando-se em uma concepção corpuscular para a luz, embora não explicitamente (Westfall, 1980).

Newton, em 1675, quando já era bem conhecido pela construção do telescópio refletor e pela sua teoria de cores publicada em 1672 (Silva & Martins, 1996), enviou à Royal Society de Londres dois longos trabalhos não publicados na época que, entre outros assuntos, condensam suas pesquisas de 1666 sobre os anéis: o *Hypothesis of light* (Newton, 2002) e um sem título, porém conhecido como *Discourse of observations* (Newton, 1978). Esse último trabalho forma a essência do Livro II do *Opticks*, publicado quase trinta anos depois.

O *Hypothesis of light* é importante, pois foi nesse trabalho que Newton elaborou uma descrição sobre a constituição do éter e sua interação com a luz, e também duas explicações diferentes para a refração e a reflexão: uma em termos de variação de densidade do éter e outra pelo movimento vibracional do éter. Newton

também desenvolveu um modelo explicativo, e não somente descritivo, para o aparecimento dos anéis de cores em filmes finos.

A idéia de classificar o trabalho como uma hipótese permitiu a Newton elaborar modelos para a luz e o éter sem entrar em conflito com estudos de outros autores da época que estudavam o mesmo assunto, como havia acontecido com a *Nova teoria de luz e cores*, de 1672 (Silva, 1996). Mas um dos problemas desta abordagem foi que Newton não poderia usar explicitamente os conceitos que abordou no *Hypothesis of light* em seus trabalhos posteriores, por não admitir que hipóteses fossem usadas para explicar os fenômenos da natureza, como ele próprio afirmou nesse trabalho:

[...] por eu haver observado que a cabeça de alguns grandes virtuosos funciona muito com base em hipóteses, como se faltasse a meus discursos uma hipótese para explicá-los, e por haver constatado que alguns, quando eu não conseguia fazê-los apreenderem meu sentido ao falar da natureza da luz e das cores em termos abstratos, apreendiam-na prontamente quando eu ilustrava meu discurso com uma hipótese. [...] que nenhum homem confunda esta com minhas outras dissertações, nem avalie a exatidão de uma por outra, nem me considere obrigado a responder a objeções sobre este texto. Pois desejo declinar de ser implicado em disputas muito aborrecidas e insignificantes. (Newton, 2002, pp. 31-2).

O método newtoniano buscava deduzir as propriedades dos fenômenos naturais a partir dos experimentos, sem o uso de hipóteses. No *Escólio Geral*, escrito em 1713 para a segunda edição do *Principia*, Newton não apenas enunciou sua famosa frase

Não faço hipóteses; [...]. O que não for deduzido a partir de fenômenos deve ser chamado de hipótese; e hipóteses, sejam metafísicas ou físicas, sejam de qualidades ocultas ou mecânicas, não têm nenhum lugar na filosofia experimental. Nesta filosofia experimental, proposições são deduzidas a partir dos fenômenos e generalizadas por indução. (Newton, 1999, p. 943).

Newton defendia que em sua filosofia natural, particularmente em seus trabalhos publicados em óptica, os aspectos experimentais e fenomenológicos deveriam ser priorizados, ao invés de construir uma ciência fundamentada no uso de hipóteses. Dessa forma, grande parte do conteúdo do *Hypothesis* não aparece explicitamente no *Opticks*.

No *Hypothesis of light*, Newton estabeleceu cinco considerações a respeito da natureza do éter e de sua interação com a luz:

1. Existiria um meio etéreo no Universo responsável pelos fenômenos ópticos, elétricos, pela gravitação e outros;
2. O éter seria capaz de sustentar movimentos vibratórios;
3. O éter penetraria nos pequenos poros dos corpos, sendo que o corpo que possuísse menos poros (como o vidro) teria menos éter em sua

composição, sendo um meio mais fortemente refrator que os outros que possuíam mais poros, como o ar.

4. A luz consistiria em raios sucessivos, que diferiam uns dos outros em aspectos como "grandeza, forma ou vigor".
5. A luz interagiria com o éter. Para Newton, a luz seria capaz de causar vibrações de diversas intensidades no éter, que interfeririam no movimento dos raios de luz, provocando a reflexão ou refração.

Newton baseou-se nestas cinco considerações sobre o éter e sua interação com a luz para explicar os fenômenos da refração, reflexão e “anéis de Newton”. Ele desenvolveu dois modelos diferentes neste mesmo trabalho: um baseado nas diferenças de densidade do éter e outro em movimentos vibracionais do éter causados pela luz. Como veremos a seguir, ambos os modelos apresentaram problemas que continuariam presentes, embora de outra forma, no *Opticks*.

DOIS MODELOS DIFERENTES NO *HYPOTHESIS OF LIGHT*

No primeiro modelo desenvolvido no *Hypothesis*, Newton baseou-se na hipótese de que a densidade do éter variava nos diferentes meios materiais para explicar a refração e a reflexão total de um raio de luz, sendo esta última um caso especial da refração. Nos meios materiais mais densos (como o vidro), a densidade do éter seria menor, devido a pouca quantidade de poros nesses materiais. Nos meios materiais menos densos (como o ar), a quantidade de poros seria maior e a densidade do éter também.

Para Newton, um raio de luz se deslocando por um meio de densidade de éter desigual, sofreria uma pressão em direção ao meio etéreo mais rarefeito, sendo assim acelerado ou retardado, dependendo da direção de seu movimento, como mostra a Figura 2.

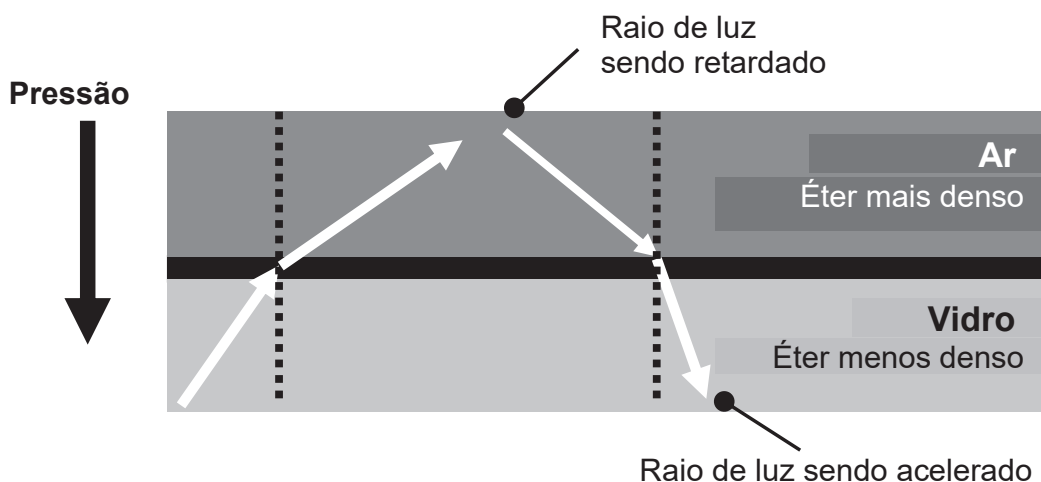


Figura 2 - Segundo Newton, existiria uma pressão atuando sobre o raio de luz provocada pela diferença de densidades do éter

Primeiramente, Newton explicou como ocorre a refração e a reflexão total do raio de luz de um meio etéreo menos denso (vidro) para um meio mais denso (o ar):

O raio, portanto, ao passar do meio [etéreo] mais rarefeito para o mais denso, inclina-se continuamente, cada vez mais, para um paralelismo com as superfícies de refração, e, se as diferentes densidades dos meios não forem muito grandes, nem a incidência do raio for tão oblíqua que o torne paralelo a estas superfícies antes de ele as atravessar, ele as atravessará e será refratado; mas se, pelas causas acima mencionadas, o raio tornar-se paralelo a estas superfícies antes de poder atravessá-las, ele deverá retornar e ser refletido. (Newton, 2002, p. 41).

Sendo assim, o raio de luz sofreria a ação de uma pressão provocada pela diferença de densidade no éter, como mostrado na Figura 2. Dependendo da inclinação do raio, ele não seria capaz de superar esta pressão e seria completamente refletido, ou seja, ocorreria o fenômeno da reflexão total, como ocorre com o raio de luz na passagem do vidro para o ar, a partir de um determinado ângulo de incidência.

No entanto, sempre que um raio de luz atinge uma superfície transparente, parte da luz é refletida e parte é transmitida. Este modelo, baseado em uma pressão devida a diferença de densidade do éter exercida sobre o raio de luz, não explicava porque parte da luz também é refletida por uma superfície refratora. Sendo assim, ainda restava explicar porque raios de luz com a mesma incidência eram parte refletidos e parte transmitidos. Para isso, Newton utilizou um novo modelo considerando vibrações no éter.

[...] E assim, suponho que a luz incidente sobre uma superfície etérea refratora ou refletora a coloque num movimento vibratório pela incidência perpétua dos raios, e que o éter nela existente seja continuamente expandido e comprimido, alternadamente, suponho que, se um raio de luz incidir sobre ela quando estiver muito comprimida, ela será densa e dura demais para permitir que o raio a atravesse e, portanto, irá refleti-lo; mas se os raios que incidem sobre ela noutros momentos, quando ela está expandida pelo intervalo entre duas vibrações, ou não muito comprimida e condensada, atravessam-na e são refratados. (Newton, 2002, p. 44).

A refração e a reflexão parciais ocorrem conjuntamente na natureza. Portanto, o modelo de vibrações no éter elaborado por Newton conseguia explicar os dois fenômenos, atribuindo as causas da reflexão ou refração parciais às regiões mais densas ou mais rarefeitas do movimento vibratório. Notemos que as vibrações no éter descritas por Newton surgem em decorrência da interação dos raios de luz com o éter presente no meio material – elas não são a própria luz, como é o caso nas teorias ondulatórias da luz.

Esse modelo não é capaz explicar a reflexão total. Newton não relacionou a intensidade das vibrações produzidas pelos raios com os seus ângulos de incidência sobre a superfície. Sendo assim, se os raios de luz excitam vibrações no éter que, dependendo de sua intensidade, permitem que os raios sejam transmitidos ou não, não é possível conceber a idéia de que a partir de uma determinada inclinação do raio de luz, as vibrações do éter excitadas por esses raios sejam tão concentradas a ponto de fazer com que os raios sejam apenas refletidos.

A intenção de Newton, ao supor que a refração e reflexão ocorrem devido ao movimento vibratório do éter, era de aliar esses dois fenômenos com os “anéis de Newton”, em que a refração e a reflexão ocorrem alternadamente (Hall, 1993). Para aplicar a hipótese de vibrações etéreas para explicar o aparecimento dos “anéis de Newton”, ele supôs que estas vibrações se moviam mais rapidamente do que os raios de luz que as provocaram. Isso era necessário, pois os raios que atingissem a parte mais condensada das vibrações seriam refletidos e os que atingissem a parte mais rarefeita seriam refratados, como pode ser visto na citação a seguir:

[...] se a luz incidir sobre uma película fina ou uma lâmina de qualquer corpo transparente, as ondas ativadas por sua passagem pela primeira superfície, ultrapassando-a uma após a outra, até ela chegar à segunda superfície, farão com que ela seja refletida ou refratada, conforme a parte condensada ou expandida da onda a supere ali, comprimindo ou relaxando esta superfície física e, com isso, aumentando ou diminuindo seu poder de reflexão. (Newton, 2002, p. 48).

Essa descrição correspondia aos anéis formados por raios de luz de uma só cor, no caso, cor verde. Sendo assim, quando os raios atingissem a parte mais rarefeita do movimento vibratório que haviam causado, seriam refletidos, formando um anel de cor verde. Se atingissem a parte mais rarefeita do movimento vibratório, seriam transmitidos, formando um anel escuro, como mostra a Figura 3.

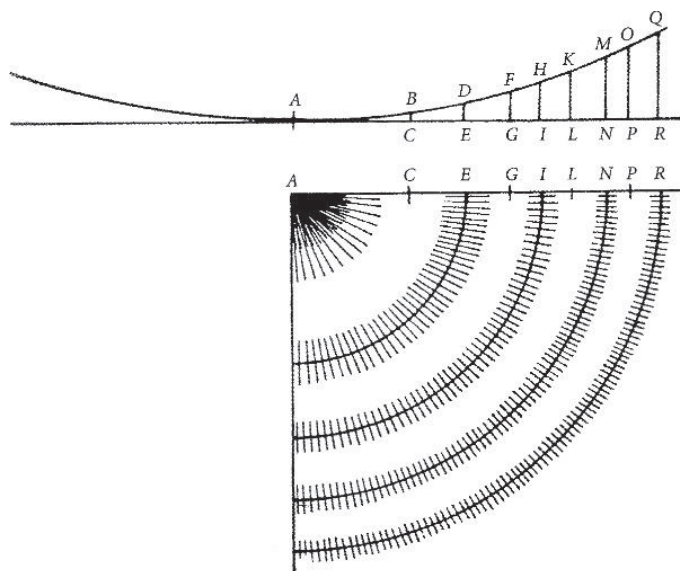


Figura 3 - Esquema de Newton no *Hypothesis of light* para ilustrar a formação dos anéis por luz monocromática (Newton, 2002, p. 49).

Para estender este modelo à luz branca, Newton introduziu a idéia de que raios de cores diferentes variavam em “magnitude, força ou vigor”, e assim excitavam no éter vibrações de diferentes intensidades que, em certo momento, transmitiriam raios de uma determinada cor e, em outros, raios de outras cores:

[...] uma vez que os raios que exibem o vermelho e o amarelo, como afirmei, excitam no éter pulsos maiores que os que fazem o azul e o violeta, e, conseqüentemente, produzem círculos maiores numa certa proporção, como verifiquei claramente que fazem, então, iluminando os vidros sucessivamente pelas referidas cores do prisma [...], os círculos produzidos pela iluminação dos vidros com luz branca não devem parecer pretos e brancos alternadamente [...]; antes, as cores que compõem a luz branca devem exhibir-se ao serem refletidas, com o azul e o violeta mais perto do centro do que o vermelho e o amarelo, pelo que qualquer círculo lúcido deve tornar-se violeta na borda interna, vermelho na externa e de cores intermediárias nas partes intermediárias, e tornar-se mais largo do que antes, espalhando suas cores nos dois sentidos em direção aos espaços que chamo de anéis negros, e que aqui pareceriam negros, se o vermelho, o amarelo, o azul e o violeta que compõem a borda dos anéis fossem retirados da luz branca incidente que ilumina os vidros, e restasse apenas o verde para produzir os anéis lúcidos. (Newton, 2002, pp. 51-2).

Essa explicação de Newton para a formação dos anéis de cores pela luz branca baseada na hipótese da existência de vibrações no éter provocadas pelos raios de luz permite uma compreensão qualitativa clara do fenômeno. No entanto, ela é de natureza puramente hipotética. No *Opticks* não há esse tipo de explicação. Neste ponto, concordamos com o historiador Alan Shapiro, que atribuiu esta omissão ao fato de que esta explicação estava no *Hypothesis* e não no *Discourse of observations*, que serviu de base para a composição do Livro II do *Opticks* (Shapiro, 1993).

Nesta seção, vimos que Newton utilizou dois modelos diferentes para explicar a refração. Um baseado na força exercida pelo éter presente nos meios materiais e outro baseado na produção de vibrações com intensidades diferentes pelos raios de luz. No entanto, ambos apresentaram problemas para explicar a reflexão parcial e total. O modelo que considerava uma força devida à diferença de densidade no meio etéreo explicava a refração e a reflexão total. Com o segundo modelo, que considerava o surgimento de vibrações no éter provocadas pelos raios de luz, Newton explicava a refração e a reflexão parciais, sem explicar como, em alguns casos, pode ocorrer a reflexão total.

Dessa forma, vemos que Newton não conseguiu unificar os fenômenos ópticos da refração, reflexão, reflexão total e "anéis de Newton" através de um único modelo. Em sua obra *Opticks*, Newton adotou uma estratégia diferente. Para tentar solucionar este problema e evitar o uso de hipóteses, ele substituiu as idéias sobre o éter pelo conceito de “estados da luz”. Mas, como veremos, Newton não conseguiu se livrar de contradições e do uso de hipóteses, principalmente nos Livros II e III.

O LIVRO II DO *OPTICKS*

Os estados de fácil reflexão e fácil transmissão da luz foram descritos no Livro II de seu *Opticks*, publicado pela primeira vez em 1704. O Livro II contém uma ampla discussão sobre a formação dos anéis de cores em películas finas, sendo dividido em quatro partes: a primeira apresentou uma grande variedade de experimentos sobre a formação de anéis coloridos em bolhas e filmes finos entre prismas e lentes. Além disso, Newton relacionou matematicamente o diâmetro dos anéis coloridos formados pela película de ar entre duas lentes com o raio de curvatura das mesmas, obtendo uma medida da espessura da película de ar existente entre as duas lentes.

Na segunda parte, Newton continuou a descrever seus experimentos, relacionando-os com os resultados obtidos na primeira parte e acrescentando um estudo sobre as cores formadas em películas de substâncias diferentes como ar, água e vidro.

Na terceira parte, Newton elaborou proposições para explicar os resultados obtidos nas duas primeiras partes. Essa parte é constituída de um total de vinte proposições e uma definição. As primeiras sete proposições são destinadas às propriedades dos corpos naturais e suas cores, formando a essência da teoria das cores dos corpos naturais de Newton. As proposições 5 a 7, em particular, relacionam as cores dos objetos com as cores dos "anéis de Newton" e buscam construir uma única teoria para explicar as diversas manifestações das cores.

Nas proposições de 8 a 10, Newton discutiu a reflexão e a refração da luz sem se comprometer explicitamente com sua natureza corpuscular, porém supondo

a existência de uma força agindo à distância entre a matéria e os raios de luz. Na Proposição 11, Newton defendeu que a luz se propaga com velocidade finita.

Finalmente, nas proposições de 12 a 20, Newton introduziu o conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão como propriedades dos raios de luz e os aplicou para a refração, reflexão e formação dos anéis coloridos em películas finas. Na quarta parte do Livro II, Newton estudou a formação de anéis em lâminas espessas.

REFRAÇÃO, REFLEXÃO E “ANÉIS DE NEWTON” NO *OPTICKS*

Como parte de seu projeto de desenvolver um modelo explicativo único para os diversos fenômenos ópticos conhecidos na época, Newton apresentou inicialmente explicações para os fenômenos da reflexão e refração no Livro II do *Opticks*. Discutimos nesta seção os diferentes modelos e explicações de Newton, seguindo a mesma ordem que elas aparecem no *Opticks*.

Uma dessas explicações está descrita na Observação 15 da parte 1, na qual Newton abordou os “anéis de Newton”, explicando as refrações e reflexões alternadas.

Observação 15

[...] E disso se evidencia a origem desses anéis; a saber, *que o ar entre os vidros*, de acordo com sua espessura variada, está disposto em alguns lugares para refletir – e em outros para transmitir – a luz de qualquer cor [...] e no mesmo lugar para refletir a luz de uma cor onde ele transmite a de uma outra cor. (Newton, 1996, p. 168, grifo nosso).

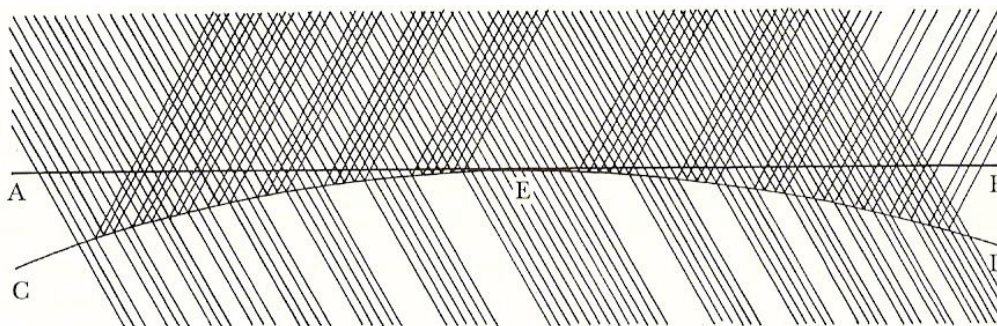


Figura 4 - Segundo Newton, em alguns pontos o ar interjacente está disposto a transmitir o raio, e em outros, a refleti-lo (Newton, 1996, p. 168).

Nesta observação, Newton afirmou que a camada de ar entre os vidros que criava disposições nos raios de luz para serem refletidos ou transmitidos. Contudo, Newton não explorou como estas disposições seriam originadas. Além disto, é curioso notar neste trecho que Newton atribui ao ar a causa dos anéis de cores, e não mais ao éter, como havia feito no *Hypothesis of light*.

Esta não foi a única explicação para a refração, a reflexão e os “anéis de Newton” abordada no *Opticks*. Na Proposição 8 da parte 3 do Livro II, Newton descreveu como a luz interagia com a matéria, apresentando diversos argumentos a favor da idéia de que “a causa da reflexão não é o choque da luz com as partes sólidas ou impenetráveis dos corpos” (Newton, 1996, p.199).

Segundo Newton, uma das evidências a favor desta idéia seria o fato de que, na reflexão total do vidro para o ar, seria improvável que

a luz, a um certo grau de obliquidade, deva deparar com suficientes poros no ar para transmitir a maior parte dela, e a outro grau de obliquidade deva deparar apenas com as partes para refleti-la completamente. (Newton, 1996, p. 200).

Outra justificativa elaborada por Newton é o fato de que os “anéis de Newton” podem ser vistos tanto por reflexão quanto por transmissão da luz. Sendo assim,

[Não seria] imaginável que em um lugar os raios que exibem, por exemplo, uma cor azul, devam ter a sorte de deparar com as partes [que os refletiriam] e os que exibem uma cor vermelha devam deparar com os poros dos corpos [que os transmitiriam]; e depois que, ao contrário, num outro lugar, onde o corpo é ou um pouco mais espesso ou um pouco mais fino, os azuis devam deparar com seus poros e os vermelhos com suas partes. (Newton, 1996, pp. 199-201).

Nessa mesma Proposição, introduziu a idéia de haveria uma força agindo entre o corpo e o raio de luz e como ela seria a responsável por refleti-lo ou transmiti-lo. Newton se questiona então como as reflexões e refrações dos raios de luz poderiam ser tão regulares. Segundo ele, a reflexão e a refração seriam devidas a um *poder* do corpo “que está espalhado uniformemente por toda sua superfície e pela qual ele age sobre o raio sem contato imediato” (Newton, 1996, p. 201), ou seja, haveria uma força agindo a distância entre o corpo e os raios de luz.

Nas proposições 9 e 10, Newton discutiu como esta força agiria sobre os raios de luz, causando fenômenos como refração, reflexão, reflexão total e também os “anéis de Newton”. Na Proposição 9, Newton defende que “os corpos refletem e refratam a luz em virtude de uma mesma força, exercida variadamente em várias circunstâncias” e explica que a reflexão total ocorre justamente quando o raio de luz incide próximo à superfície e, por isso, a força exercida pela superfície é tão grande que não permite que este raio seja transmitido. Newton explica vagamente como esta força também seria responsável pela reflexão e refração alternadas envolvidas nos anéis, considerando que “a espessura do vidro determina se a força pela qual o vidro atua sobre a luz fará com que ela seja refletida ou permitirá que seja transmitida” (Newton, 1996, p. 203).

Na Proposição 10, Newton deduziu a lei dos senos para a refração considerando, ao contrário do que aceitamos hoje, que a luz se propagaria com uma

velocidade maior em um meio mais denso. Nessa dedução, ele considera que somente a componente vertical da força age sobre o raio desviando-o em sua trajetória.

Como vemos, a intenção de Newton era unir as explicações de refração, reflexão e “anéis de Newton” através de um único modelo, no caso, a existência de uma força agindo a distância entre os corpos transparentes e os raios de luz.

A explicação utilizando o conceito de *força* não se relaciona com a apresentada anteriormente na Observação 15. Assim, podemos ver que Newton não possuía uma única explicação para os fenômenos da refração, reflexão e anéis de cores em filmes finos. Ele certamente soube descrever o comportamento dos raios de luz nesses fenômenos, como fez no Livro I e na primeira parte do Livro II, mas não conseguiu desenvolver, até esta parte do *Opticks*, um modelo explicativo único e coerente para os fenômenos ópticos descritos por ele.

OS “ESTADOS DA LUZ”

Após deduzir a lei dos senos para a refração utilizando a hipótese da existência de uma força agindo sobre os raios de luz perpendicularmente à superfície transparente, Newton aprofundou as idéias discutidas previamente na Observação 15, introduzindo o conceito de “estados da luz”.

Esse conceito é discutido nas proposições 12 a 20 da parte 3 do Livro II do *Opticks*. A intenção de Newton era que ele fosse um elemento unificador das explicações para a refração, reflexão e anéis de cores em filmes finos. Newton pensou estar se livrando do uso de hipóteses sobre as causas desses fenômenos, como as presentes no *Hipótese da luz*, e eliminando contradições em suas explicações, como as descritas acima. No entanto, como veremos, os “estados da luz” são mais uma das hipóteses utilizadas por Newton em sua óptica.

A definição dos estados foi descrita por Newton entre a Proposição 12 e 13 da parte 3 do Livro II:

Definição

Chamarei de estados de fácil reflexão aos retornos da tendência de qualquer raio para ser refletido; aos de sua tendência para ser transmitido, estados de fácil transmissão; e ao espaço que se sucede entre cada retorno e o retorno seguinte, intervalo de seus estados. (Newton, 1996, p. 212).

O raio de luz que estivesse em um estado de fácil transmissão assim que atingisse a segunda superfície do filme fino, seria transmitido e o raio de luz que estivesse em um estado de fácil reflexão seria refletido. Dependendo da espessura do filme, os raios de luz estariam em um desses estados, podendo ser transmitidos ou refletidos, processo que se repetiria com o incremento de quantidades

proporcionais de espessura. Sendo assim, se um raio de luz monocromática atingisse o filme fino, ora ele estaria num estado de fácil transmissão ora num estado de fácil reflexão e, dependendo da espessura, ocasionaria o surgimento sucessivo de anéis escuros e coloridos na cor do raio, respectivamente.

Numa análise superficial, as explicações para os "anéis de Newton" os estados da luz parecem satisfatórias e de fácil entendimento. Contudo, no estudo detalhado das proposições de 12 a 20, encontramos diversos problemas e inconsistências na definição e usos deste conceito.

Um dos aspectos problemáticos dos estados é sua origem. Inicialmente, Newton defendeu na Proposição 12, que os estados não são propriedades inatas dos raios de luz, como as cores, mas sim uma propriedade adquirida após a interação da luz com uma superfície transparente:

Todo raio de luz, *em sua passagem* através de qualquer superfície refratora, assume uma certa constituição ou estado transitório que ao longo da trajetória do raio retorna em intervalos iguais e faz com que em cada retorno o raio tenda a ser facilmente transmitido através da próxima superfície refratora e, entre os retornos, a ser facilmente transmitido por ela (Newton, 1996, p. 210, grifo nosso).

Quando o raio atravessa a superfície ele adquire a propriedade de ser refletido ou refratado. É a passagem por uma superfície que causa no raio de luz esta tendência. Isso contraria o que Newton disse anteriormente na Observação 15 da Parte I e nas Proposições 9 e 10 da Parte 3, onde afirmou respectivamente que o ar entre as superfícies estaria disposto a transmitir ou refletir o raio de luz e que haveria uma força do corpo refrator ou refletor sobre o raio de luz, ocasionando sua refração ou reflexão.

Ainda na Proposição 12, Newton elaborou uma hipótese para explicar microscopicamente a interação da luz com a matéria muito semelhante à apresentada anteriormente no *Hypothesis of light*, substituindo o meio etéreo pelo próprio meio material.

Que tipo de ação ou tendência é esta, se consiste num movimento vibratório do raio, ou do meio, ou de alguma outra coisa, não o indago aqui. Aqueles que se negam a admitir quaisquer novas descobertas, exceto as que conseguem explicar por uma hipótese, poderão supor que [...] os raios de luz, chocando-se com qualquer superfície refratora ou refletora, produzem vibrações no meio ou substância refratora e refletora e, assim fazendo, agitam as partes sólidas dos corpos refrator ou refletor e [...] que as vibrações assim produzidas se propagam no meio ou substância refratora ou refletora da mesma maneira que as vibrações se propagam no ar para causar o som e se movem mais rápido do que os raios, de modo a ultrapassá-los; e que, quando qualquer raio está naquela parte da vibração que contribui para seu movimento, ele irrompe facilmente através de uma superfície refratora, mas quando está na parte oposta da vibração, que lhe impede o movimento, é facilmente refletido; e, por conseqüência, que todo raio tende sucessivamente a ser facilmente refletido ou facilmente transmitido por toda vibração

que o ultrapassa. Mas se tal hipótese é verdadeira ou falsa é coisa que não considero aqui. (Newton 1996, p. 211-2).

Nesse trecho, vemos também que Newton está explicitamente considerando hipóteses, porém não como parte importante de seu trabalho. Para Newton, elas são necessárias apenas para aqueles "que se negam a admitir quaisquer novas descobertas, exceto as que conseguem explicar por uma hipótese" (Newton 1996, p. 211). Novamente fica claro que, embora contrariado, Newton usou várias hipóteses ao longo de seu trabalho.

Outro aspecto problemático são as explicações para o fenômeno da reflexão total. O conceito de estados da luz da maneira definida por Newton no *Opticks* não conseguiria explicar a reflexão total, pois não haveria nenhuma razão para que os raios de luz, ao passarem de um meio mais denso (o vidro) para um meio mais rarefeito (o ar), estivessem todos em estados de fácil reflexão. Além do mais, como sabemos, o que determina se um raio sofrerá reflexão total é o índice de refração do meio e o ângulo de incidência. Nenhuma destas variáveis foi levada em conta no modelo proposto por Newton, uma vez que a disposição para ser refletido seria uma propriedade do raio.

Na Proposição 13, Newton considerou os estados como propriedades inatas dos raios de luz, contrariando não apenas o que havia afirmado na Proposição 12, como sendo contraditório em uma mesma proposição:

Portanto, a luz se acha em estados de fácil reflexão e fácil transmissão *antes de incidir* sobre os corpos transparentes. E provavelmente *ela assume esses estados na sua primeira emissão* dos corpos luminosos e continua neles durante toda sua trajetória. Nesta proposição, suponho que os corpos transparentes são espessos; porque, se a espessura do corpo for muito menor do que o intervalo dos estados de fácil reflexão e transmissão dos raios, o corpo perde seu poder refletor. *Pois se os raios, que ao entrarem no corpo assumem estados de fácil transmissão*, chegam à superfície mais distante do corpo antes de perder esses estados, eles devem ser transmitidos. E esta é a razão pela qual as bolhas de água perdem seu poder refletor quando se tornam muito finas; e também a razão pela qual todos os corpos opacos, quando divididos em partes muito pequenas, se tornam transparente. (Newton 1996, p. 212-3, grifo nosso).

Como vemos, na mesma proposição Newton se contradiz, ora afirmando que os raios de luz já assumiriam seus “estados” logo em sua primeira emissão no corpo luminoso ora afirmando que os raios adquiririam os “estados” ao entrarem no corpo.

Na *Questão 29* do Livro III do *Opticks*, Newton considerou novamente a possibilidade de os estados estarem relacionados com vibrações:

Para colocar os raios de luz em estados de fácil reflexão e fácil transmissão, basta que eles sejam corpúsculos que por seus poderes de atração, ou por alguma outra força, excitam vibrações naquilo que agem, vibrações estas que, sendo mais rápidas do que os raios, os ultrapassem sucessivamente e os agitem de modo a aumentar e diminuir

alternadamente suas velocidades, colocando-os assim nesses estados. (Newton 1996, p.272).

Notemos que o modelo de vibrações é idêntico ao desenvolvido no *Hypothesis of light* contudo, Newton foi cuidadoso em não atribuir as vibrações a nenhum meio em especial, se limitando a dizer que as vibrações ocorriam "naquilo que agem" os raios de luz.

Temos, portanto, várias explicações diferentes para os fenômenos da refração, reflexão e anéis de cores em filmes finos. Primeiramente, na Observação 15, Newton afirmou que o ar estaria disposto a transmitir ou refletir os raios de luz. Logo depois, na Proposição 9, afirmou que existiria uma força entre os corpos materiais e os raios de luz, ocasionando esses fenômenos. Estas duas primeiras explicações não se relacionam com os estados da luz.

As outras duas explicações utilizaram o conceito de estados da luz, mas diferem na discussão de sua origem, ora afirmando que seria pelo choque dos raios de luz com as partículas dos corpos ora que seria por uma força entre os raios de luz e os corpos.

Esses fatos mostram que o conceito de estados da luz não estava bem definido para Newton. Fica nítido analisando suas descrições até agora que a tentativa de unir as explicações sobre a refração, a reflexão e os anéis de cores era demasiada complexa. Apesar de num primeiro momento, o conceito de estados de fácil reflexão e estados de fácil transmissão aparentar ser suficiente para explicar os fenômenos ópticos discutidos no *Opticks*, principalmente os “anéis de Newton”, ela foi uma entre várias outras tentativas utilizadas por Newton para explicar os intrigantes fenômenos da luz e cores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do ponto de vista epistemológico, os estados se inserem em um projeto maior de Newton de buscar explicações únicas para os vários fenômenos ópticos conhecidos na época baseando-se apenas no método indutivo. Na abertura do *Opticks* ele afirma que seu propósito “não é explicar as propriedades da luz por hipóteses, mas propô-las e prová-las pelo raciocínio e por experiências” (Newton 1996, p. 39). Na *Questão 31* do *Opticks*, Newton deixou clara sua opção pelo método indutivo e sua aversão às hipóteses:

Essa análise consiste em fazer experiências e observações, em tirar conclusões gerais delas por indução e em não admitir objeções contra as conclusões exceto aquelas que decorrem das experiências ou de algumas outras verdades. Pois as hipóteses não devem ser consideradas na filosofia natural. E, embora a argumentação pela indução a partir de experiências e observações não seja a demonstração de conclusões gerais, ainda assim é

o melhor caminho de argumentação que a natureza das coisas admite, e pode ser considerada tanto mais forte quanto mais geral é a indução. (Newton 1996, p. 292).

Ao longo de vários anos, Newton elaborou diversos modelos para tentar explicar importantes fenômenos ópticos tais como a refração, a reflexão, a reflexão total e os "anéis de Newton". No artigo *Hypothesis of light*, de 1675, desenvolveu dois modelos diferentes: um baseado na diferença de densidade do éter entre dois meios materiais diferentes e outro no movimento vibracional do éter causado por sua interação com a luz.

No final do Livro II, Newton introduziu o conceito de estados de fácil reflexão e estados de fácil transmissão para explicar os fenômenos da refração, reflexão e "anéis de Newton". Ele acreditava que com os estados estaria livre do uso de hipóteses, partindo do princípio de que eles seriam propriedades originais da luz, livres de qualquer tipo de discussão sem fundamento experimental, como as cores e a refrangibilidade. No entanto, não foi isso que observamos ao estudarmos em detalhes o Livro II do *Opticks*. As hipóteses aparecem não somente nas *Questões*, mas também ao longo do Livro II e III do *Opticks*. Além disso, Newton mudava de uma hipótese a outra sem apresentar razões para abandonar a hipótese anterior.

Ao propor os estados da luz para explicar a formação de cores em filmes finos, Newton não seguiu a metodologia acima. A abordagem usada por Newton baseou-se fortemente no uso de hipóteses, embora isso não tenha ocorrido de forma explícita, o que nos parece natural, uma vez que Newton deixou claro em vários momentos que para o estabelecimento de uma ciência segura não se deveria "misturar conjecturas com certezas".

O caráter hipotético dos estados da luz aparece mais claramente quando consideramos o fato de Newton ter adotado várias explicações diferentes, além dos estados, para fenômenos como a refração e reflexão. Além disso, os estados não são uma indução dos fenômenos, mas sim uma hipótese sobre propriedades microscópicas dos raios de luz, que não podem ser checadas experimentalmente, mas apenas inferidas a partir de efeitos observáveis. Apesar de Newton negar o papel das hipóteses em sua filosofia natural, elas estão presentes e desempenham o importante papel de ajudar no entendimento de propriedades descobertas experimentalmente e ajudam na elaboração de novos experimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUCHWALD, J.Z.; COHEN, I.B. (eds.). *Isaac Newton's natural philosophy*. Cambridge, MA: MIT Press, 2001.
- COHEN, I.B.; SMITH, G.E. *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- HALL, A.R. *All was light: an introduction to Newton's "Opticks"*. Oxford: Clarendon Press, 1993.

- MARTINS, R.A.; SILVA, C.C. Newton and colour: the complex interplay of theory and experiment. *Science & Education* **10 (3)**: 287-305, 2001.
- MCGUIRRE, J.E.; TAMNY, M. (eds.). *Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- NEWTON, I. *Opticks*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1996[1704].
- NEWTON, I. Discourse of observations. In: COHEN, I.B.; SCHOFIELD, R.E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978. Pp. 202-235.
- NEWTON, I. A Hipótese da Luz. In: COHEN, I.B.; WESTFALL, R.S. (eds.). *Isaac Newton: textos, antecedentes, comentários*. Rio de Janeiro: Eduerj; Contraponto, 2002.
- NEWTON, I. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy; a new translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman*. Berkeley: University of California Press, 1999.
- SABRA, A.I. *Theories of light from Descartes to Newton*. London: Cambridge University Press, 1981.
- SHAPIRO, A.E. *Fits, passions and paroxysms*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- SHAPIRO, A.E. Newton's optics and atomism. In: COHEN, I.B.; SMITH, G. E. *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- SILVA, C.C. *A teoria das cores de Newton: um estudo crítico do Livro I do Opticks*. Campinas, SP: Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 1996.
- SILVA, C.C.; MARTINS, R. de A. A "Nova Teoria sobre Luz e Cores" de Isaac Newton: uma tradução comentada. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **18 (4)**: 313-327, 1996.
- WESTFALL, R.S. *Never at rest, a biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
- WHITTAKER, E. A history of the theories of aether and electricity; the classical theories. *History of modern physics, 1800-1950*, v.7, 1983.