

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz?



Breno Arsioli Moura¹, Cibelle Celestino Silva²

¹*Pós-graduação Interunidades em Ensino de Ciências, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, Rua do Matão, Travessa R, nº 187, Ala II, Sala 318, São Paulo, Brasil.*

²*Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador Sancarlense 400, São Carlos, SP, Brasil, 13560-590.*

E-mail: brenoam@if.usp.br, cibelle@ifsc.usp.br

(Recibido el 30 de Junio de 2008; aceptado el 15 de Agosto de 2008)

Resumo

É muito comum encontramos menções às idéias elaboradas por Isaac Newton em materiais voltados ao ensino e divulgação da Física. Alguns desses textos, ao tratarem a óptica newtoniana, apresentam informações sugerindo que ele teria previsto o comportamento dual ao assumir um modelo corpuscular que foi também utilizado para explicar fenômenos ópticos com propriedades periódicas. Estes relatos históricos se apóiam nas discussões de Newton sobre o fenômeno dos anéis coloridos em películas finas e, especialmente, no conceito de “estados de fácil transmissão e fácil reflexão” da luz publicado em seu livro *Óptica* para explicá-lo. O presente artigo traz uma análise histórica pautada no *Óptica* e em outros trabalhos de Newton sobre óptica. O estudo de fontes primárias e secundárias mostra que Newton era completamente avesso a qualquer possibilidade de um modelo ondulatório para a luz e que os “estados” da luz não são uma antecipação da dualidade onda-partícula. Com este trabalho, pretendemos mostrar, entre outras coisas, que devemos evitar analisar contribuições de cientistas do passado com os olhos do presente desconsiderando o contexto no qual tais idéias foram desenvolvidas.

Palavras-chave: História da óptica, Isaac Newton, dualidade onda-partícula.

Abstract

It is not rare to find mentions to Isaac Newton's ideas in sources and material devoted to Physics teaching and dissemination to a broader public. Some of these texts and internet websites suggest that Newton had anticipated light dual behavior in his optical studies. The main evidences for this sort of affirmation rely on the fact he assumed a corpuscular model for light and used it to explain optical phenomena with periodic properties. These historical accounts use Newton's discussion on colored rings in thin films and his concept of “fits of easy reflection and easy transmission” of light published in his book *Opticks*. The present paper brings a historical study based on examination of *Opticks* and other Newton's works on optics. The analysis of primary and secondary sources shows that Newton was refractory to any possibility of an undulatory model for light. Moreover, it indicates that “fits” were not a foresight of wave-particle duality. This paper intends to show, among other things, that we must regard the context in which ideas of past scientists were developed and avoid considering them as anticipations of currently accepted concepts.

Keywords: History of optics, Isaac Newton, wave-particle duality.

PACS: 01.65.+g, 01.50.Zv, 01.30.-y

ISSN 1870-9095

I. INTRODUÇÃO

A discussão das idéias elaboradas por Isaac Newton (1642-1727) é uma prática muito comum em materiais didáticos e de divulgação científica voltados à Física, inclusive em páginas da internet sobre assuntos relacionados à Ciência. A fim de tornar o discurso ágil, ilustrativo e de fácil entendimento para o grande público, são apresentados breves relatos históricos, geralmente ressaltando a genialidade de Newton e a importância de suas realizações para o progresso, validade e estabilidade do conhecimento científico aceito atualmente.

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008

Nesse cenário, muitos desses materiais apresentam informações indicando que Newton teria previsto o comportamento dual da luz em sua óptica. A principal evidência estaria em suas investigações sobre o fenômeno dos anéis coloridos formados por películas finas¹ – conhecidos atualmente por “anéis de Newton” – e no

¹ Atualmente, esse fenômeno é explicado pelo conceito de interferência entre ondas luminosas refletidas nas superfícies do filme. Para mais detalhes, ver [1].

conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão² que Newton elaborou para explicá-lo.

Os estados da luz de Newton são pouco conhecidos pelos físicos, e também pouco estudados detalhadamente por historiadores da ciência. Entretanto, quando são citados, freqüentemente é dito que eles representam a união entre as concepções corpuscular e ondulatória para a luz. Portanto, os estados poderiam ser considerados como uma antecipação da concepção moderna de dualidade onda-partícula da luz. Um livro de divulgação científica trata essa questão da seguinte maneira:

Os livros elementares diziam (dizem) que Newton acreditava na teoria corpuscular da luz; mas parece que a coisa não era tão simples assim; ele achava que a luz era basicamente corpuscular, não ondulatória, mas com propriedades ondulatórias. Ele fez também experiências de difração e interferência, de modo que sabia que a luz tinha propriedades ondulatórias. Dizia que quando um corpúsculo luminoso se aproxima do orifício ou fenda, o corpúsculo pode ter fits [estados da luz], isto é, pode ir numa direção ou noutra. Naquela época, a idéia de probabilidade não estava muito clara ainda; então, ele usou a palavra fits, que já era uma idéia probabilística; quer dizer que a luz era basicamente corpuscular, mas poderia ter também estes efeitos conhecidos de interferência e difração. [2]

Em um livro sobre a óptica do século XVII, voltado, principalmente, a historiadores da ciência e físicos, o argumento sobre os estados é praticamente o mesmo. A discussão inclui uma citação (entre aspas) do físico Louis de Broglie em seu trabalho *Ondes, corpuscles, mécanique ondulatoire* (1945):

A teoria dos estados de Newton foi forçada a ficar no esquecimento depois do impressionante sucesso da teoria ondulatória no século passado [o século XIX]. Desde a invenção da mecânica ondulatória, o interesse nas especulações de Newton sobre as origens dos estados tem se renovado – do ponto de vista histórico. Sua tentativa de combinar concepções corpusculares e ondulatórias tem

² O termo em inglês originalmente utilizado por Newton para designar esta propriedade da luz foi "fits of easy reflection and transmission". Na época, segundo o *Oxford English Dictionary*, o termo "fits" era utilizado freqüentemente na área médica para denominar o ataque repentino, mas transitório, de algum tipo de doença. Newton foi o primeiro a utilizá-lo em óptica. Esse termo foi traduzido para o português como "caminhos", "acessos", "ajustes", entre outras palavras. No entanto, preferimos utilizar o termo "estados", como adotado na edição em português do *Óptica*. Pelo estudo do *Óptica* e dos trabalhos anteriores de Newton sobre o assunto, vemos que a palavra "estados" é a que melhor representa o significado do termo "fits" utilizado por Newton. Isso aparece claramente na proposição 12 do Livro II da versão original em inglês do *Óptica*, na qual ele afirmou que o fato de um raio ser transmitido ou refletido é consequência de que "Every Ray of Light in its passage through any refracting Surface is put into a certain transient Constitution or **State**, which in the progress of the Ray returns at equal Intervals, and dispose the Ray at every return to be easily transmitted through the next refracting Surface, and between the returns to be easily reflected by it" [grifo nosso].

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz? sido considerada como um "tipo de pressentimento da mecânica ondulatória". [3]

Como terceiro exemplo, na página da internet de uma sociedade espanhola da área de oftalmologia é dito o seguinte sobre os estados:

Según Newton, la condición para la formación de un anillo coloreado en el experimento de Hook es que un espacio de aire entre la lente y la lámina de vidrio corresponde a un fit. Newton asoció una magnitud diferente de fit con cada índice de refracción. Así, un concepto esencial de la teoría ondulatoria entró a formar parte de su sistema. [4]

Em um livro sobre a história das teorias sobre éter e eletricidade, direcionado a um público que procura informações históricas adequadas, mas sintetizadas, o autor lança um comentário sofisticado sobre os estados:

[...] notável antecipação da explicação quântica do século XX: os "estados de fácil transmissão e fácil reflexão" correspondem às probabilidades transitórias da teoria quântica. [5]

Há algumas fontes que apresentam outras interpretações sobre os estados, não considerando explicitamente que eles representaram uma antecipação do comportamento dual da luz. Por exemplo, o autor de um artigo publicado em uma revista da área de ensino de física de ampla circulação no Brasil afirma que os estados – traduzidos por ele como "acessos" – foram elaborados para explicar o comportamento da luz no fenômeno da difração:

Desse modo, afirmava Newton, as regiões claras e escuras da figura de difração estariam ligadas ao acesso ("fits") que os corpúsculos de luz teriam ao passar ou não pela fenda e, uma vez passados por ela, tais corpúsculos poderiam ir ou não para um lado ou para o outro da referida fenda. [6]

Em duas páginas da internet ligadas a universidades brasileiras os estados não são mencionados, entretanto, o pressuposto de que Newton uniu concepções corpusculares e ondulatórias em sua óptica é novamente estabelecido:

*[...] para explicar os **anéis de interferência**, postulou mais tarde a existência de certos **aspectos ondulatórios** da luz [...]. A teoria de Newton é, portanto, **compósita, híbrida entre ondulatória e corpuscular**. [7]*

*A muito custo, publicou o artigo *Opticks* (1704). Nele, Newton tratou da teoria da luz e cor, relatou sobre os anéis de Newton e sobre difração da luz. Para explicar algumas de suas observações, Newton necessitou usar o modelo ondulatório juntamente com o seu modelo corpuscular. [8]*

De diversas formas, esses comentários sobre os estados contribuem para a crença de que eles foram uma antecipação do conceito moderno de dualidade onda-partícula. Mas será que podemos considerar que realmente Newton propôs algo que poderia ser interpretado atualmente como uma previsão desse conceito moderno para a luz? A forma mais segura de responder a essa pergunta é proceder uma análise histórica pautada na obra do próprio Newton.

Para isso, faremos, inicialmente, uma discussão sobre os primeiros estudos de Newton sobre o fenômeno dos

anéis coloridos e suas explicações para tratá-lo. Em seguida, analisaremos detalhadamente os estados da luz – descrito por Newton no Livro II de seu *Óptica*, publicado pela primeira vez em 1704 –, examinando quais são seus fundamentos conceituais.

Veremos que esse conceito newtoniano está longe de ser uma antecipação da dualidade onda-partícula, indicando que essa visão se trata de uma interpretação distorcida da óptica de Newton, que pode (e deve) ser evitada no decorrer da educação científica.

II. “ANÉIS DE NEWTON”: PRECEDENTES

O fenômeno dos anéis em cores em películas finas começou a ser estudado por Newton em meados de 1665 e 1666, cerca de quarenta anos antes da publicação do conceito de estados da luz no *Óptica*, em 1704. Suas primeiras observações e análises sobre esse fenômeno foram motivadas pelas leituras dos trabalhos de dois outros filósofos naturais do período, Robert Boyle (1627-1691) e Robert Hooke (1635-1703).

Na obra *Experiments and considerations touching colours*, publicada em 1664, Boyle analisou superficialmente a formação dos anéis de cores. Seu livro não tratava a óptica em si, mas da relação entre a matéria e suas propriedades ópticas, incluindo a cor. Newton leu e estudou as idéias de Boyle, concordando com algumas partes, por exemplo, o pressuposto de que as cores dos corpos não eram qualidades deles, mas produzidas pela refração e reflexão da luz; e discordando de outras, por exemplo, a idéia de que os raios coloridos eram modificações da luz branca [9, pp. 13-17].

Hooke, por outro lado, apresentou um estudo sistemático sobre a formação dos anéis em seu *Micrographia*, publicado em 1665. Ele realizou diversos experimentos com líquidos de vários tipos pressionados contra duas lâminas de vidro, bolhas e superfícies de metais. Hooke supunha que a luz seria uma sucessão de pulsos propagados pelo éter. Segundo ele, os anéis seriam ocasionados pela mistura de dois pulsos, um refletido na primeira superfície do filme e outro refletido na segunda. Apesar da semelhança aparente com a concepção atual de interferência luminosa, vale ressaltar que Hooke não utilizou qualquer terminologia parecida com a adotada atualmente.

Newton rejeitou todas essas idéias de Hooke. Contudo, o *Micrographia* provavelmente foi considerado por ele uma importante fonte de informações, instigando vários de seus estudos sobre os anéis coloridos e outros assuntos relacionados à luz [9, p. 20].

A partir da leitura e estudo dos trabalhos de Boyle e Hooke, Newton realizou suas primeiras observações sobre os anéis, resultando no ensaio “Sobre as cores” [10], escrito em 1666 e não publicado na época. Nesse trabalho, ele descreveu diversas ocasiões em que o fenômeno ocorria e procurou – sem grande sucesso – calcular a espessura da película de ar responsável pela formação dos anéis. Nesse ensaio, Newton não desenvolveu nenhum

modelo explicativo para esse fenômeno, se restringido a discutir algumas observações.

Em 1675, Newton enviou a *Royal Society* de Londres dois trabalhos contendo estudos mais detalhados sobre os anéis: o “Discurso das observações” [11] e “A hipótese da luz” [12]. No primeiro, ele descreveu e discutiu uma série de observações sobre a formação dos anéis coloridos com maior riqueza de detalhes, em relação ao ensaio de 1666. Ele relatou com mais minúcia, por exemplo, a ordem das cores, o formato dos anéis, os instrumentos utilizados para realizar os experimentos, entre outras coisas. O conteúdo desse trabalho é praticamente o mesmo do *Óptica* – que seria publicado quase trinta anos depois –, exceto por algumas descrições a mais e pela parte correspondente ao conceito de estados da luz [9, p. 117]. No segundo, por sua vez, Newton não somente descreveu observações como também elaborou pela primeira vez uma explicação para o fenômeno, por meio do modelo de vibrações no éter.

Por ser um modelo importante para compreendermos o desenvolvimento histórico do conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão e dos estudos de Newton sobre o fenômeno dos anéis coloridos, procederemos com uma análise detalhada sobre ele na próxima seção.

III. AS VIBRAÇÕES NO ÉTER

No início do “Hipótese”, Newton afirmou que o universo estaria preenchido por um meio etéreo, que preenchia os espaços vazios dos corpos, que ele chamou de poros. Os corpos mais rarefeitos (por exemplo, o ar) teriam mais poros, portanto, mais éter; os mais densos (por exemplo, a água, o vidro e os metais) teriam menos éter em sua composição.

Segundo Newton, ao se chocarem com a luz, as partículas de éter adquiriam movimento vibratório:

Fosse eu presumir uma hipótese, ela seria esta, se proposta em termos mais gerais, de modo a não determinar o que é a luz além de [dizer] que ela é uma ou outra coisa capaz de provocar vibrações no éter [...] [12, p. 31].

A fim de evitar possíveis interpretações equivocadas sobre essa hipótese, Newton afirmou explicitamente que a luz *não* seria nem o éter nem essas vibrações nele provocadas.

[...] presumo que a luz não seja nem esse éter nem seu movimento vibratório, porém algo de natureza diferente, propagado por corpos luminosos. Quem o assim desejar poderá presumi-la como um agregado de várias qualidades peripatéticas. Outros poderão supô-la como uma multidão de corpúsculos inimaginavelmente pequenos e velozes, de tamanhos diversos, brotando dos corpos luminosos a grandes distâncias uns dos outros, mas sem nenhum intervalo perceptível de tempo, e continuamente impulsionados por um princípio de movimento que, no início, acelera-os até que a resistência do meio etéreo iguale a força desse princípio, exatamente da maneira que como os corpos que caem na água são acelerados até que a resistência da água se iguale à força da gravidade [...].

Para evitar discussões e generalizar esta Hipótese, que cada homem escolha sua preferência quanto a isso. Apenas, seja a luz o que for, eu suporia que ela consiste em raios sucessivos, que diferem uns dos outros em circunstâncias contingentes, como a grandeza, a forma ou o vigor [...] [12 p. 39].

Nota-se que, apesar de estabelecer diferenças entre os raios de luz (grandeza, forma ou vigor), Newton não deixou claro que a luz seria um corpúsculo, preferindo tratá-la em termos gerais. Com essa questão esclarecida, ele explicou como as vibrações no éter influenciariam no comportamento da luz nos corpos. Para ele, as vibrações provocadas nas partículas de éter teriam regiões condensadas e rarefeitas, que fariam com que o raio fosse refletido ou transmitido. Sendo assim,

[...] se um raio de luz incidir sobre ela [a vibração] 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 [...] [12, p. 44].

Há uma periodicidade implícita nas vibrações no éter, ou seja, à medida que elas se propagam pelo meio, ora estão condensadas ora estão expandidas. Utilizando esses dois pressupostos (luz provoca vibrações no meio etéreo; dependendo da intensidade da vibração, o raio será refletido ou transmitido), Newton explicou, por exemplo, a refração e reflexão parciais dos raios de luz, quando de suas incidências na superfície de um corpo transparente, e, principalmente, a formação dos anéis coloridos em filmes finos. Para esse último fenômeno, ele incluiu mais uma suposição: as vibrações das partículas de éter se moviam mais rapidamente que os raios de luz que as provocaram. Segundo ele,

[...] embora a luz seja inimaginavelmente veloz, as vibrações etéreas provocadas por um raio movem-se mais depressa que o próprio raio e, desse modo, ultrapassam-no e o superam, uma após outra [12, p. 48].

Dessa forma, Newton explicou o fenômeno dos anéis da seguinte maneira:

Presumida essa celeridade das vibrações, portanto, se a luz incidir sobre uma película fina ou lâmina de qualquer corpo transparente, as ondas ativadas por sua passagem pela primeira superfície, ultrapassando-a uma após 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 [...] Se a lâmina for de espessura tal que a parte condensada da primeira onda ultrapasse o raio na segunda superfície, ele deverá refletir-se; se tiver o dobro dessa espessura, de tal modo que a parte rarefeita seguinte da onda, isto é, o espaço entre ela e a onda seguinte, a supere, ali ele deverá ser transmitido [...] [12, pp. 48-49].

Newton ilustrou como isso seria evidente no caso da incidência de raios monocromáticos sobre uma película de ar entre duas lentes. Quando os raios de luz se chocam com as partículas de éter presentes na película fina – de ar,

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz? água ou de outra substância –, essas começam a vibrar; e a propagação dessas vibrações é mais rápida que a propagação dos raios de luz ao longo da película. Periodicamente, essas vibrações ficam mais intensas ou mais rarefeitas. Ao atingirem a segunda superfície do filmes, os raios que se deparam com as regiões onde a intensidade da vibração é maior são refletidos, formando um anel da cor do feixe incidente; se atingem regiões onde a intensidade da vibração é menor, eles são transmitidos, formando um anel preto, como mostra a figura 1.

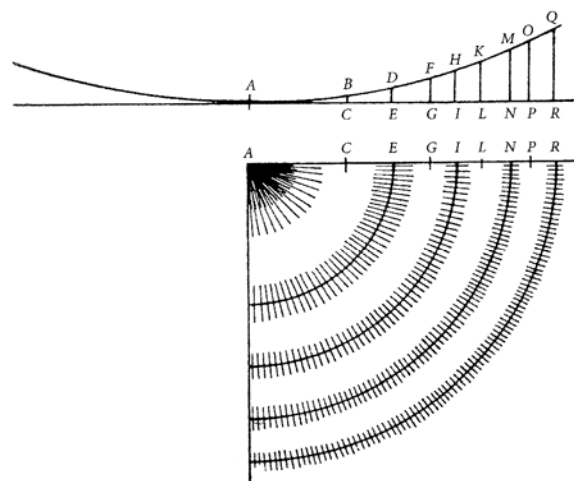


FIGURA 1. Desenho no artigo “A hipótese da luz”, mostrando os anéis pretos e da cor do raio (claros, na figura) formados pela incidência de luz monocromática.

Sendo assim, a ordem do anel (colorido ou preto) estaria relacionada com a periodicidade das vibrações. Dependendo da espessura, essas vibrações podem estar mais intensas ou rarefeitas, refletindo ou transmitindo os raios de luz. Para estender essa explicação para o caso de incidência de luz branca, Newton afirmou que, assim como as vibrações do ar de tamanhos diferentes eram resultado da propagação de tons sonoros diferentes, os raios coloridos causariam vibrações diferentes no ar.

[...] esses raios, sejam eles o que forem, ao diferirem em magnitude, intensidade ou vigor, provocam vibrações de diversas grandezas; os raios maiores, mais fortes ou mais potentes [provocam] as maiores vibrações, e os outros, vibrações mais curtas, conforme seu tamanho, intensidade ou potência; E então [...] afetam o sentido com várias cores, conforme sua grandeza e mistura [...] [12, p. 46].

Dessa forma, em determinadas situações, as vibrações provocadas pela incidência de luz branca, dependendo de sua intensidade na segunda superfície do filme, refletiriam raios de uma cor e transmitiriam raios de outra cor. Isso explicaria os vários anéis coloridos, como mostra a figura 2.

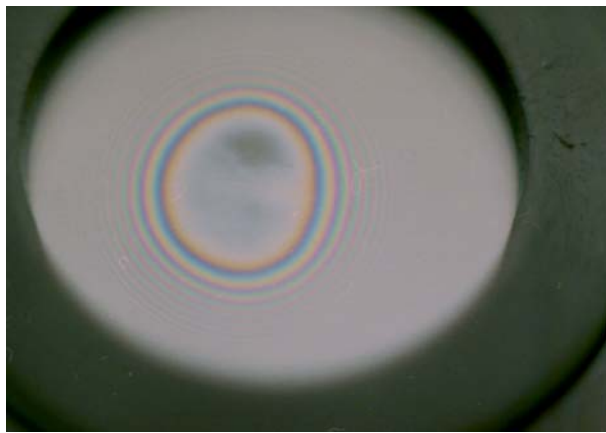


FIGURA 2. Anéis coloridos, formados pela incidência de luz branca sobre um sistema de lentes.

A explicação para a formação dos anéis coloridos em películas finas por meio do modelo de vibrações do éter permite uma compreensão qualitativa do fenômeno. No entanto, esse modelo apresenta alguns problemas. O primeiro deles refere-se ao fenômeno da reflexão total do raio de luz, em sua passagem por um meio mais denso (por exemplo, o vidro) para um meio mais rarefeito (por exemplo, o ar). Se os raios de luz sempre provocam vibrações nas partículas de éter presentes nos corpos, as quais ora os refletem ora os transmitem, não fica claro como essas vibrações agiriam para refletir todos os raios a uma determinada inclinação destes em relação à normal com a superfície refratora. Newton não discutiu essa questão.

Outro ponto problemático está relacionado com os anéis formados em filmes finos de água. No “Discurso das observações” ele relatou o aparecimento dos anéis em películas de água entre lentes, notando que a mesma ordem de anéis que era produzida pelo ar aparecia mais contraída no filme de água. Ou seja, para produzir um anel colorido na água era necessária uma espessura menor, em relação àquela que produzia esse mesmo anel no ar.

Como vimos, Newton relacionou a ordem dos anéis com a periodicidade das vibrações no éter. Sendo assim, para adequar suas observações em filmes de água, ele supôs que as vibrações nesse meio eram mais curtas que no ar, por isso, os mesmos anéis no ar eram formados em uma espessura menor na água:

[...] nas lâminas de corpos transparentes mais densos [que o ar], os anéis são produzidos numa espessura menor que da lâmina (sendo mais curtas as vibrações no éter mais rarefeito do que no mais denso, segundo suponha) [...] [12, p. 54].

Se as vibrações são mais curtas em meios com pouco éter como a água, a velocidade de propagação dos raios de luz deve também ser menor, a fim de se adequar à afirmação de Newton de que as “vibrações etéreas provocadas por um raio se movem mais depressa que o próprio raio”. No entanto, isso contraria sua freqüente e pública defesa de que os raios se movem mais rapidamente em meios mais densos (como a água) que em meios menos densos (como o ar). Newton não comentou sobre esse

problema, provavelmente ciente de que ela deporia contra suas idéias e favoreceria concepções para a luz que supunham uma velocidade menor dos raios em meios mais densos que o ar, como a vibracional elaborada por Hooke [13].

O conteúdo do “Hipótese” e o modelo de vibrações no éter não foram incorporados explicitamente no *Óptica*. A razão disto foi que Newton não admitia publicamente o uso de hipóteses em seus trabalhos, apesar de freqüentemente utilizá-las, tanto como artifícios coadjuvantes como partes fundamentais de suas idéias [14]. No “Escólio Geral” de seu primeiro livro, os *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ou somente *Principia*, publicado em 1687, ele defendeu explicitamente essa posição:

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. [15]

Portanto, para explicar o fenômeno dos anéis coloridos em películas finas, Newton elaborou outra idéia: o conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão. Segundo ele, os estados seriam comprovados somente pelos experimentos, não necessitando de hipóteses – como a de vibrações – para fundamentá-los. Entretanto, como indicaremos a seguir, o conceito de estados carregou o caráter especulativo das explicações do artigo “A hipótese da luz”.

IV. OS ESTADOS DA LUZ

O conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão foi descrito e analisado entre as proposições 12 e 20 da parte 3 e em toda parte 4 do Livro II do *Óptica*. Estudos recentes apontam para a importância desse conceito para a óptica newtoniana, ressaltando que Newton pretendia construir com ele uma explicação única para vários fenômenos ópticos [14]. Neste trabalho, não discutiremos essa questão, restringindo nossa análise sobre o que é e como ele apresentou e aplicou esse conceito no fenômeno dos anéis coloridos em filmes finos.

A definição dos estados foi apresentada entre as proposições 12 e 13, sendo a seguinte:

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 [16, p. 212].

Os estados seriam propriedades transitórias; 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.

No caso de incidência de luz monocromática sobre um filme fino de ar, os anéis alternadamente coloridos e pretos seriam explicados facilmente pelo conceito de estados. Em uma determinada espessura, os raios estão em um estado de fácil transmissão, formando um anel preto; em outra, os raios estão em um estado de fácil reflexão, formando um anel colorido. No caso da luz branca, anéis de diversas cores seriam formados tanto por transmissão quanto por reflexão, visto que alguns raios coloridos estavam em um estado de fácil transmissão, e outros em um estado de fácil reflexão, como mostra a figura 3.

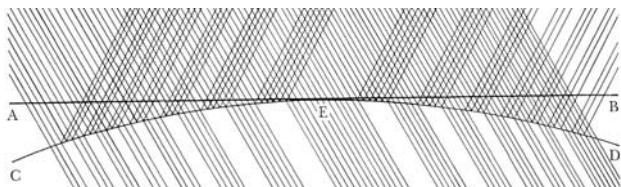


FIGURA 3. Figura do *Óptica*, mostrando o comportamento dos raios de luz de um feixe de luz branca ao incidirem em uma película fina de ar entre duas lentes. Os raios que estivessem num estado de fácil transmissão seriam transmitidos e aqueles que estivessem num estado de fácil reflexão seriam refletidos.

Nota-se que os estados não guardam, em sua definição, qualquer combinação entre concepções corpusculares e ondulatórias para a luz. Newton se restringiu a afirmar somente que eles eram responsáveis pela refração e reflexão alternadas dos raios de luz no fenômeno dos anéis coloridos em películas finas.

Em uma leitura superficial das discussões de Newton sobre os estados da luz, eles são satisfatórios e facilmente aplicáveis para tratar a formação dos anéis coloridos em películas finas, já que leva em conta a periodicidade do fenômeno e explica a alternância de cores dos anéis. No entanto, Newton não deixou clara a natureza e causa dos estados. A análise dessa questão evidencia que esse conceito, além de apresentar alguns problemas de fundamentação teórica, estava muito longe de ser uma antevisão da dualidade onda-partícula.

Sobre a natureza dos estados, Newton se contradisse em alguns trechos do Livro II do *Óptica*. Na proposição 12, anterior à definição do conceito, ele afirmou que as tendências que fariam com que os raios fossem transmitidos ou refletidos – logo em seguida denominadas de estados da luz – não eram propriedades inatas desses raios, mas adquiridas na passagem por um meio refrator:

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 refletido por ela [16, p. 210, grifo nosso].

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz?

Entretanto, na proposição 13, Newton contrariou não somente sua afirmação feita na proposição 12, como também foi contraditório na 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 [16, pp. 212-13, grifo nosso].

Portanto, Newton apresentou declarações obscuras sobre a natureza dos estados da luz, ora afirmando que eles eram propriedades presentes nos raios de luz desde sua primeira emissão dos corpos luminosos ora estabelecendo que eles eram resultado da interação entre a luz e o meio refrator. No caso dessa última suposição, Newton explorou a causa dos estados. Segundo ele, a discussão sobre essa questão não seria importante, visto que a existência dos estados seriam comprovadas pelos experimentos com os anéis coloridos em filmes finos. Mesmo assim, ele elaborou algumas hipóteses para tratá-la.

Na proposição 12, Newton afirmou que as reflexões e refrações alternadas dos raios – devidas aos estados – seriam resultado de vibrações causadas pelo choque da luz com as partículas do meio refrator, uma hipótese praticamente igual à descrita no artigo “A hipótese da luz”.

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, assim como as pedras ao cair na água conferem a esta um movimento ondulatório, e assim como todos os corpos produzem vibrações no ar por percussão, assim 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 consequência, 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 [16, pp. 211-12].

Esse trecho deixa claro que Newton não conseguiu se desvencilhar do modelo de vibrações no éter, elaborado no artigo de 1675. Além disso, e principalmente, suas palavras indicam que a transição da idéia de vibrações para os estados foi uma mudança intencional para evitar a discussão de hipóteses, o que fica evidente por sua última frase.

Nas famosas *Questões* do Livro III do *Óptica*, Newton mencionou novamente que a causa dos estados seriam as vibrações em um meio, no entanto, essas agora ocasionadas por poderes de atração da luz.

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 [16, p. 272].

No entanto, essa causa para os estados baseada em vibrações do meio apresenta o mesmo problema em relação aos experimentos com filmes finos de água. Assim como no artigo de 1675, no Livro II do *Óptica*, Newton relatou algumas observações sobre esse caso particular da formação dos anéis, descrevendo que esses apresentavam-se mais contraídos, em comparação àqueles formados por um filme de ar. Dessa forma, se os estados fossem causados por vibrações no meio, essas não poderiam ultrapassar os raios de luz em meios mais densos que o ar.

Do mesmo modo, os estados não explicam o fenômeno da reflexão total da luz. Supondo que os raios de luz estão sempre ou em um estado de fácil transmissão ou em um estado de fácil reflexão, não haveria nenhuma razão para que todos eles estivessem nesse último estado ao passarem, por exemplo, de um meio mais denso (como o vidro) para um meio menos denso (como o ar). Além disso, o que determina se um raio sofrerá a reflexão total são a diferença de densidade entre os meios e o ângulo de incidência, variáveis que eram conhecidas e foram estudadas por Newton, mas não levadas em conta ao discutir os estados da luz.

Esses pontos obscuros em relação ao conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão indicam, por um lado, que há várias particularidades em relação a ele que não são notadas somente por uma análise superficial do discurso newtoniano. Por outro lado, eles denotam que esse conceito é completamente diferente da concepção moderna de dualidade onda-partícula da luz, que leva em conta diversos parâmetros que não estavam estabelecidos – e nem poderiam – na época de Newton.

Com base nesse estudo histórico, apontaremos na próxima seção quais são os erros presentes nas citações sobre o conceito de estados apresentadas na introdução.

V. PORQUE NEWTON NÃO SUPÔS UM COMPORTAMENTO DUAL PARA A LUZ

No primeiro exemplo da introdução, foi dito que Newton “acreditava na teoria corpuscular da luz; mas parece que a coisa não era tão simples assim; ele achava que a luz era basicamente corpuscular, não ondulatória, mas com propriedades ondulatórias. Ele fez também experiências de difração e interferência, de modo que sabia que a luz tinha propriedades ondulatórias”. Somente nesse trecho, há vários erros históricos e conceituais, que estão presentes, de formas diferentes, nos outros exemplos apresentados. Tais erros podem levar a uma interpretação equivocada não só da óptica newtoniana, como da óptica do século XVII em geral, fomentando a idéia de que Newton teria suposto a dualidade onda-partícula.

O primeiro deles refere-se à interpretação sobre a concepção ondulatória para a luz, e está presente na maioria das citações acima. No século XVII, o conceito de ondas era expressivamente diferente do atual, sendo assim, é necessário cautela ao considerá-lo em discussões de fatos da história da óptica. O historiador da ciência Casper Hakfoort afirma que apenas a teoria introduzida por Leonhard Euler (1707-1783) na metade do século XVIII pode ser classificada de ondulatória, visto que somente a partir dela foram incorporadas as idéias de frequência e periodicidade para tratar as ondas de luz [17]. Tais características não estavam presentes nos estudos sobre a luz no século XVII. Dessa forma, as teorias desse período que são atualmente consideradas ondulatórias se enquadram melhor como teorias vibracionais, pois, essencialmente, levavam em conta somente a idéia de que a luz seria algum tipo de vibração sobre um meio, por exemplo, o éter.

Outro revés está na utilização do termo “interferência”. A utilização dessa palavra para discutir os experimentos de Newton sobre os anéis de cores em películas finas pode levar a uma interpretação anacrônica dos fatos históricos. Dependendo da circunstância na qual for empregada, ela pode suscitar a suposição de que o fenômeno dos “anéis de Newton” já era, no século XVII, considerado um resultado da interferência entre os raios de luz, concepção que adotamos atualmente. No entanto, como vimos, nem Newton e nenhum outro pesquisador do período utilizaram esse conceito.

Entretanto, o ponto mais problemático está na suposição de que o filósofo natural inglês teria admitido que a luz possuiria propriedades ondulatórias ao realizar experimentos de difração e interferência. O terceiro e os dois últimos exemplos apresentados na introdução contêm afirmações semelhantes, especulando sobre uma suposta combinação entre concepções corpusculares e ondulatórias na explicação desses fenômenos. Isso apoiaria a idéia de que os estados seriam uma antecipação do comportamento dual para a luz. Como discutimos logo acima, se isso ocorreu, o conceito de onda corresponderia à idéia de vibração propagada em algum meio. No entanto, a análise histórica apresentada acima indica a incoerência dessa proposição.

Ao analisar o fenômeno dos anéis coloridos em películas finas no artigo “A hipótese da luz”, Newton afirmou que a causa do aparecimento dos anéis era o movimento vibracional do éter, as quais eram provocadas pelo choque da luz com esse meio etéreo. Tais vibrações seriam mais ou menos intensas dependendo da cor do raio de luz, a qual diferia, segundo Newton, em “magnitude, intensidade ou vigor”. Por meio dessa idéia, ele explicou tanto a formação de anéis coloridos pela incidência de luz branca sobre a película quanto a formação de anéis alternadamente escuros e claros pela incidência de luz monocromática.

O comportamento vibracional – e não ondulatório – que ocasionaria o aparecimento dos anéis era uma característica das partículas do meio etéreo, e não dos raios de luz. Portanto, Newton não admitiu que a luz tinha propriedades vibracionais, tampouco ondulatórias, apenas afirmou que ela provocaria o surgimento dessas características no éter. Do mesmo modo, no caso da difração, estudos históricos apontam que ele estava longe de aceitar qualquer propriedade ondulatória para a luz na explicação desse fenômeno, considerando-o como resultado da interação entre a luz e os corpos por meio de forças de curto alcance [18, 19].

No *Óptica*, ao elaborar e argumentar sobre o conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão, Newton afirmou que uma possível causa para eles seriam as vibrações no meio refrator provocadas pelo choque dos raios de luz com as partículas desse meio. Como apontamos na seção IV, essa hipótese é semelhante às idéias sobre vibrações no éter presentes em “A hipótese da luz” e, conseqüentemente, também não carregam qualquer traço de uma possível combinação de concepções corpusculares e ondulatórias para a luz. Apesar de Newton discutir essa causa para os estados, ele explicitamente afirmou que isso não era importante, pois a existência de estados de fácil transmissão e fácil reflexão seria comprovada pelos experimentos, não necessitando de qualquer argumento de caráter especulativo.

Assim, fica claro que Newton não uniu idéias corpusculares e ondulatórias em nenhum momento da discussão sobre o fenômeno dos anéis coloridos em películas finas no *Óptica* ou em trabalhos anteriores. Ele estabeleceu somente que a luz seria algo capaz de provocar vibrações no éter – que não eram propriamente a luz –, as quais seriam responsáveis pelo aparecimento dos anéis.

O erro nos relatos apresentados no início do artigo sobre a união entre concepções corpusculares e ondulatórias fica ainda mais evidente pela explícita rejeição de Newton à concepção vibracional para a luz, presente em vários de seus trabalhos sobre óptica. Nas famosas *Questões do Óptica*, ele deixou clara essa posição:

Não são errôneas todas as hipóteses segundo as quais a luz consistiria em pressão ou movimento propagados através de um meio fluido? [...] E é igualmente difícil explicar, por essas hipóteses, como os raios podem estar alternadamente em estados de fácil reflexão e fácil transmissão, a não ser, talvez que se pudesse supor que há

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz? em todo espaço dois meios vibratórios etéreos e que as vibrações de um deles constitui a luz, e as vibrações do outro são mais rápidas, colocando-os nesses estados tão freqüentemente quanto ultrapassam as vibrações do primeiro. Mas é inconcebível como dois éteres podem estar difundidos por todo espaço, um dos quais age sobre o outro e, por conseqüência, sofre uma reação, sem retardar, destruir, dispersar e confundir os movimentos um do outro [16, pp. 265-67].

Portanto, afirmar que Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula para a luz constitui uma interpretação anacrônica da história das ciências, que procura associar o conceito newtoniano de estados de fácil transmissão e fácil reflexão àqueles aceitos atualmente para tratar o comportamento da luz. Tal ação não leva em conta o desenvolvimento histórico e teórico desse conceito e os vários obstáculos enfrentados por Newton ao concebê-lo e descrevê-lo no *Óptica*. Essas interpretações distorcidas e descontextualizadas sobre os estados ficam evidentes na leitura de outras partes das citações apresentadas na introdução.

Em outro trecho do primeiro exemplo, foi dito que na época de Newton “a idéia de probabilidade não estava muito clara ainda; então, ele usou a palavra *fits*, que já era uma idéia probabilística; quer dizer que a luz era basicamente corpuscular, mas poderia ter também estes efeitos conhecidos de interferência e difração”. Entretanto, quando dizemos que algo é provável, significa que pode ou não acontecer, pressuposto que Newton não utilizou ao conceber os estados. Segundo suas descrições, a luz, adquirindo ou sendo submetida aos estados, estaria sempre ou em um estado de fácil transmissão ou em um estado de fácil reflexão ou no intervalo entre eles. Não haveria possibilidade de nada acontecer. Aparentemente, o autor não levou em consideração as hipóteses elaboradas por Newton para discutir a origem e causa dos estados – tampouco seus problemas –, as quais evidenciam que esse conceito não foi elaborado com base em concepções probabilísticas.

No segundo exemplo, foi dito que a tentativa de Newton “de combinar concepções corpusculares e ondulatórias” por meio dos estados da luz “tem sido considerada como um ‘tipo de pressentimento da mecânica ondulatória’”. No quarto exemplo, os estados são considerados correspondentes “às probabilidades transitórias da teoria quântica”. Entretanto, Newton não elaborou – e nem poderia – o conceito de estados baseado nos modelos atuais, fundamentados na mecânica quântica. Na óptica newtoniana não há qualquer traço de elementos conceituais que fazem parte da óptica moderna, por exemplo, a idéia de elétron, próton, fóton, efeito fotoelétrico, radiação de corpo negro, entre outros.

Portanto, os estados de fácil transmissão e fácil reflexão de Newton não foram uma antevisão do conceito moderno de dualidade onda-partícula para a luz. O conteúdo do Livro II do *Óptica* – assim como todas as obras newtonianas – denota que Newton era um homem de seu tempo, imerso nas teorias aceitas no período e engajado na discussão dos vários fenômenos naturais

estudados na época a partir de suas crenças sobre o funcionamento do mundo. A presente análise deixa claro que as eventuais semelhanças entre suas idéias e as atuais são, em grande parte, resultado de um exercício de imaginação baseado em visões distorcidas e anacrônicas da história das ciências.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, pela expansão do acesso ao conhecimento, é fácil obter informação superficial e ilustrativa sobre diversos assuntos relacionados à física em materiais didáticos, em livros e revistas de divulgação científica e em páginas da internet. Entretanto, no caso da discussão de fatos da história das ciências, diversos estudos têm apontado para erros históricos grosseiros presentes nessas fontes [20-23].

Newton não antecipou a dualidade onda-partícula por meio dos estados e nem poderia, como ressaltamos na seção anterior. Anteriormente ao *Óptica*, no artigo “A hipótese da luz”, Newton discutiu a idéia de vibrações no éter, provocadas pelo choque dos raios de luz com as partículas de um meio etéreo que permeava os corpos. Por meio dessa conjectura, ele foi capaz de explicar satisfatoriamente a formação de anéis coloridos em películas finas de ar. No entanto, ao tratar a formação dos anéis em filmes de água, a idéia de vibrações esbarrou em um problema crucial, o qual não foi discutido por Newton.

Quase trinta anos depois, no *Óptica*, Newton substituiu a hipótese de vibrações no éter pelo conceito de estados da luz, que acreditava ser comprovado pelos experimentos. Aplicando-o para explicar o fenômeno dos anéis de cores em películas finas, Newton foi, até certo ponto, bem sucedido. Ao discutir a origem e causa, ele enfrentou problemas parecidos com aqueles presentes na idéia de vibrações no éter do artigo “A hipótese da luz”.

As questões relativas ao desenvolvimento do conceito de estados da luz podem ser levadas principalmente a cursos de formação inicial e continuada de professores de física. Eles podem ser instigados a discutir os métodos, as hipóteses e os erros imersos no discurso newtoniano, ilustrando que a obra de Newton possui diversas nuances que denotam o caráter complexo do processo de construção e estabelecimento do conhecimento científico. Comparando a análise histórica sobre os estados com as descrições distorcidas presentes em muitos materiais voltados à física, podem ser criados debates sobre como ler e utilizar adequadamente estudos históricos, segundo cada contexto educacional.

Acreditamos que o presente trabalho oferece subsídios suficientes para esclarecer e minimizar visões equivocadas sobre o conceito de estados e sobre uma possível antevisão do comportamento dual da luz na óptica de Newton. A partir disso, novas iniciativas para o ensino de física podem ser desenvolvidas, favorecendo um entendimento adequado da natureza da ciência e do processo de construção do conhecimento científico.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e as sugestões de Thais Cyrino de Mello Forato e Esdras Viggiano.

REFERÊNCIAS

- [1] Young, M., *Óptica e lasers* (Edusp, São Paulo, 1998), pp. 137-39
- [2] Schenberg, M., *Pensando a Física* (Landy Editora, São Paulo, 2001), pp. 60-61.
- [3] Sabra, A. I., *Theories of light from Descartes to Newton* (Cambridge University Press, Cambridge, 1981), pp. 341-42.
- [4] <http://www.oftalmo.com/ergo/ergo1998/02cap02.htm>, acessado em 07 de Maio, 2008.
- [5] Whittaker, E., *A history of the theories of ether and electricity – the classical theories* (Thomas Nelson and Sons Ltd, London, New York, 1951), p. 22, nota 1.
- [6] Bassalo, J. M. F., *A crônica da óptica clássica*. Caderno Catarinense de Ensino de Física **4**, 140-50 (1987).
- [7] <http://plato.if.usp.br/1-2003/fmt0405d/apostila/opticaonda/node4.html>, acessado em 26 de Março, 2008.
- [8] <http://fisica.cdcc.sc.usp.br/Cientistas/IsaacNewton.html>, acessado em 26 de Março, 2008.
- [9] Hall, A. H., *All was light: an introduction to Newton's "Opticks"* (Clarendon Press, Oxford, 1993).
- [10] Newton, I., “Of colours”, in: McGuire, J. E., Tamny, M. *Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook* (Cambridge University Press, Cambridge, 1983).
- [11] Newton, I. [Discourse of observations], in: Cohen, I.B. and Schofield, R. E. (eds.), *Isaac Newton's papers and letters on natural philosophy* (Harvard University Press, Cambridge – MA, 1978), pp. 202-35.
- [12] Newton, I., “A hipótese da luz – uma hipótese explicativa das propriedades da luz sobre as quais discorrem meus diversos artigos”, in: Cohen, I. B. and Westfall, R. (eds.), *Newton: textos, antecedentes, comentários* (EdUerf / Contraponto, Rio de Janeiro, 2002), pp. 30-54.
- [13] Stuewer, R. H., *Was Newton "wave-particle duality" consistent with Newton's observations?*, *Isis* **60**, 392-94 (1969).
- [14] Moura, B. A.; Silva, C. C., A teoria dos estados da luz: considerações sobre alguns papéis das hipóteses na óptica newtoniana. In: Martins, R.A.; Silva, C.C.; Ferreira, J. M. H.; Martins, L. A.C. P., *Filosofia e história da ciência no Cone Sul. Seleção de trabalhos do 5º Encontro*. (Associação de Filosofia e História da Ciência, Campinas, 2008), pp. 91-100.
- [15] Newton, I., *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy; a new translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman* (University of California Press, Berkeley, 1999), p. 943.
- [16] Newton, I., *Óptica* (Edusp, São Paulo, 1996).

- [17] Hakfoort, C., *Optics in the age of Euler – conceptions of the nature of light, 1700-1795*. (Cambridge University Press, Cambridge, 1995), pp. 1-10.
- [18] Stuewer, R., *A critical analysis of Newton's work on diffraction*, *Isis* **61**, 188-205 (1970).
- [19] Hall, A. R., *Beyonde the fringe: diffraction as seen by Grimaldi, Fabri, Hooke and Newton*, *Notes and Records of the Royal Society of London* **44**, 13-23 (1990).
- [20] Martins, R. A., *Como não escrever sobre História da Ciência – um manifesto historiográfico*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 113-129 (2001).
- Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz?*
- [21] Martins, R. A., *A maçã de Newton: histórias, lendas e tolices*. In: Silva, C.C. *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*.
- [22] Silva, C. C.; Martins, R. A., *A teoria das cores de Newton: um exemplo do uso de história da ciência em sala de aula*, *Ciência e Educação* **9**, 53-65 (2003).
- [23] Pagliarini, C. R., “Uma análise da história e filosofia da ciência presente em livros didáticos de física para o ensino médio”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.