



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ARAGUAÍNA  
LICENCIATURA EM FÍSICA**

**PHABLO HENRIQUE DUARTE MAIA**

**A ENIGMÁTICA LUZ: HISTÓRIA, CONCEITOS E IDEIAS –  
UMA LUZ SOBRE A LUZ**

**ARAGUAÍNA-TO**

**2018**

PHABLO HENRIQUE DUARTE MAIA

A ENIGMÁTICA LUZ: HISTÓRIA, CONCEITOS E IDEIAS –  
UMA LUZ SOBRE A LUZ

Monografia apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Araguaína para obtenção do título de Licenciado em Física, sob orientação da Prof.<sup>a</sup> Sheyse Martins de Carvalho.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sheyse Martins de Carvalho

ARAGUAÍNA-TO

2018

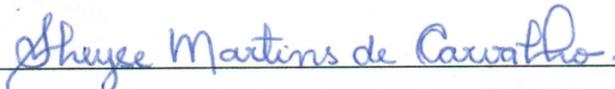
PHABLO HENRIQUE DUARTE MAIA

A ENIGMÁTICA LUZ: HISTÓRIA, CONCEITOS E IDEIAS –  
UMA LUZ SOBRE A LUZ

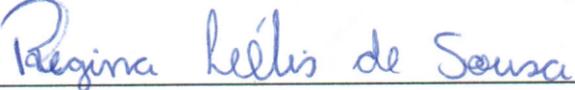
Monografia foi avaliada e apresentada à UFT –  
Universidade Federal do Tocantins – Campus  
Universitário de Araguaína, Curso de Licenciatura em  
Física para a obtenção do título de licenciado em Física e  
aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela  
Banca Examinadora.

Aprovada em: 16 / 06 / 2018

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Sheyse Martins de Carvalho, Orientadora, UFT

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Érica Cupertino Gomes, Examinadora, UFT

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Regina Lélis de Sousa, Examinadora, UFT

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus,  
por ser essencial em minha vida, aos meus  
pais, Pedro Anísio e Maria Gorete, e aos meus  
irmãos, Victor Matheus e Agnes Dey.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, a Deus por ter me dado forças e saúde para o término desse trabalho.

À minha família que me deu apoio em todos os momentos durante minha caminhada acadêmica.

À minha orientadora Sheyse Martins de Carvalho, por ter acreditado em mim, pelo conhecimento compartilhado, dedicação e ótima orientação, com quem partilhei o que era o broto daquilo que veio a ser esse trabalho.

Às professoras Érica Cupertino Gomes e Regina Lélis de Sousa. Foi um prazer tê-las na composição da banca examinadora.

A todos os professores do curso, que foram importantes na minha vida acadêmica. Em especial ao professor Matheus Pereira Lobo, que durante três anos de Iniciação Científica, manteve-me sempre orientado com os métodos e técnicas adequadas para o desenvolvimento da pesquisa; sendo algumas de interessante aplicação na área da pesquisa teórica. Por seus ensinamentos, paciência e confiança ao longo das supervisões das minhas atividades da Iniciação. E por ter apresentado a Mecânica Quântica, a Física Teórica e a Matemática Pura.

Aos colegas de curso, pessoas que convivi nesses espaços ao longo de quatro anos, experiências de produção compartilhada, que contribuíram para a minha formação acadêmica.

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim e que participaram direta e/ou indiretamente na elaboração deste trabalho.

A todos os filósofos e historiadores da ciência brasileiros citados neste trabalho, pelos seus esforços de tradução para o português dos escritos gregos, latinos, e demais idiomas.

*“Se não consegue explicar de forma simples, não entendeste bem o suficiente.” (Albert Einstein)*

*“A luta para compreender o estranho mundo em que vivemos é nobre. É um esforço contínuo. Nossa atual síntese científica é mais um passo na estrada que leva a uma imagem mais ampla, mas não o último. Nossos paradigmas serão substituídos por novos e aprimorados conjuntos de teoria...” (Colin A. Ronan)*

*“Não é somente através de descobertas e do seu registro pelas sociedades eruditas que a ciência avança. O verdadeiro lugar da ciência não é o volume de “Transactions”, mas a mente viva, e o avanço da ciência consiste em orientar as mentes dos homens por um canal científico; seja isto realizado pelo anúncio de uma descoberta, a formulação de um paradoxo, a invenção de uma frase científica ou a exposição de um sistema de doutrina.” (James Clerk Maxwell)*

## RESUMO

Este trabalho apresenta um panorama histórico sobre a natureza da luz e seus fenômenos, que intrigaram durante muito tempo as maiores mentes do meio científico. Dada a relevância deste assunto, apresentamos a evolução do conceito de luz e a sua interpretação ao longo dos tempos, através dos aspectos da história da ciência. Com este trabalho, pretendemos tornar mais clara a trajetória dos pensamentos para construção dos conceitos envolvidos neste assunto, cujo resultados culminaram no entendimento que temos hoje sobre luz, e a formação dos pilares da Física Moderna. Como uma forma de contribuir para o entendimento acerca do assunto, visto que há poucos trabalhos historiográficos e filosóficos que abordam a concepção da luz tanto na história ocidental quanto oriental, e por falta de bibliografia em português para o tema, realizamos uma pesquisa que abrangesse tanto os aspectos bibliográficos quanto descritivos dos personagens que fizeram parte da história da luz.

**Palavra Chave:** História da Ciência, Natureza da Luz, Teoria Ondulatória, Teoria Corpuscular.

## **ABSTRACT**

This work presents a historical panorama about the nature of light and its phenomena, which have intrigued the greatest minds of the scientific environment for a long time. Given the relevance of this issue, we present the evolution of the concept of light and its interpretation over time through the aspects of the history of science. With this work, we intent to make clear the trajectory of thoughts to construct the concepts involved in this subject, whose results culminated in the understanding we have today about light, and the formation of the pillars of Modern Physics. As a way of contributing to the understanding of the subject, since there are few historiographical and philosophical works that address the conception of light in both Western and Eastern history, and for lack of bibliography in Portuguese for the theme, we conducted a research that covered both the bibliographic and descriptive aspects of the characters who were part of the history of light.

**Keyword:** History of Science, Nature of the Light, Wave theory, Corpuscular theory.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Esquema da camera de pinhole chinesa .....	16
<b>Figura 2</b> - Esquema do periscópio chinês.....	28
<b>Figura 3</b> - Reflexão segundo Descartes .....	42
<b>Figura 4</b> - Refração segundo Descartes .....	43
<b>Figura 5</b> - Refração segundo Hooke.....	45
<b>Figura 6</b> - Formação das cores segundo Hooke.....	46
<b>Figura 7</b> - Formação das cores em diferentes camadas de mica.....	47
<b>Figura 8</b> - Ilustração da dispersão cromática por um prisma.....	48
<b>Figura 9</b> - Geometria da atração ou impulsão de corpos no espaço intermendiário.....	51
<b>Figura 10</b> - Comprovação geométrica entre os senos de incidência e emergencia .....	52
<b>Figura 11</b> - Igualdade entre os senos de incidência e emergência para a reflexão total	53
<b>Figura 12</b> - Esquema da difração da luz na parte de corte da faca .....	54
<b>Figura 13</b> - Reflexão no vidro segundo Newton .....	55
<b>Figura 14</b> - Propagação retilínea da luz segundo Huygens .....	61
<b>Figura 15</b> - Reflexão segundo Huygens. ....	62
<b>Figura 16</b> - Refração segundo Huygens .....	64
<b>Figura 17</b> - Passagem das ondulações luminosas por uma abertura de Thomas Young	71
<b>Figura 18</b> - Ilustração do experimento da proposição VIII .....	73
<b>Figura 19</b> - Ilustração da formação das cores de filmes finos ou expressos.....	74
<b>Figura 20</b> - Dispersão espectral nas três formulações .....	94
<b>Figura 21</b> - Formas dos espelhos esféricos.....	103
<b>Figura 22</b> - Reflexão dos raios de luz em um espelho côncavo .....	104
<b>Figura 23</b> - Reflexão dos raios de luz no espelho convexo .....	104
<b>Figura 24</b> - Tipos de lentes .....	105
<b>Figura 25</b> - Difração dos raios de luz na lente convergente .....	105
<b>Figura 26</b> - Difração dos raios de luz na lente divergente.....	105
<b>Figura 27</b> - Aspectos da reflexão.....	106
<b>Figura 28</b> - Posição aparente causada pela refração .....	106
<b>Figura 29</b> - Aspectos da reflexão.....	107
<b>Figura 30</b> - Representação de difração causada por um furo .....	108
<b>Figura 31</b> - Processo de Dispersão da luz no prisma e na gota d'água .....	108
<b>Figura 32</b> - Padrão de formação das cores para luz.....	109

<b>Figura 33</b> - Esquema do processo de interferência e o resultado .....	109
<b>Figura 34</b> - Processo de polarização pelo polaroide .....	110
<b>Figura 35</b> - Representação gráfica dos tipos de polarização .....	110
<b>Figura 36</b> - Representação gráfica de uma onda eletromagnética .....	111
<b>Figura 37</b> - Espectro eletromagnético.....	112

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>A PRÉ-CONCEPÇÃO DA TEORIA DA LUZ.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Do século VI a.C. ao século I a.C.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Do século I ao século VII.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3</b>	<b>Do século VIII ao século XVI.....</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>A CONCEPÇÃO MODERNA DA TEORIA DA LUZ.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Newton e Huygens .....</b>	<b>47</b>
<b>3.2</b>	<b>Young e Fresnel .....</b>	<b>66</b>
<b>3.3</b>	<b>Faraday e Maxwell .....</b>	<b>81</b>
<b>3.4</b>	<b>Radiação do corpo negro .....</b>	<b>92</b>
<b>3.5</b>	<b>Planck e Einstein.....</b>	<b>94</b>
<b>4</b>	<b>PROPRIEDADES DA LUZ.....</b>	<b>102</b>
<b>4.1</b>	<b>Óptica Geométrica.....</b>	<b>102</b>
4.1.1	Reflexão.....	106
4.1.2	Refração.....	106
<b>4.2</b>	<b>Óptica Ondulatória .....</b>	<b>107</b>
4.2.1	Difração .....	107
4.2.2	Interferência.....	109
4.2.3	Polarização.....	110
<b>4.3</b>	<b>Óptica Quântica.....</b>	<b>111</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>113</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A luz e os fenômenos a ela relacionados sempre instigaram a curiosidade humana. Grandes civilizações registravam o que pensavam sobre os fenômenos luminosos, tanto as suas características quanto a origem. Algumas atrelavam o caráter sobrenatural em suas explicações, outras adotavam o caráter racional de interpretar tais fenômenos. Mas todas tinham o mesmo objetivo de entender a luz.

Em muitas ocasiões históricas, a luz se tornava palco de controvérsias e, volta e meia, suscitavam grandes discussões entre os filósofos (ou cientistas) envolvidos. Essas discussões proporcionavam tanto o esclarecimento das ideias (ou teorias) propostas quanto as dificuldades (ou falhas) ao explicar os fenômenos luminosos. Alguns filósofos desenvolviam teorias tão à frente do seu tempo que ninguém possuía uma moldura conceitual para entendê-las. Já outros filósofos conceituavam as suas teorias de uma tal forma, que a maioria das pessoas de sua época tinham dificuldades em assimilar os seus conceitos. Algumas ideias foram aceitas gradualmente, à medida que seus últimos oponentes se calavam; um cenário que se fez presente no desenvolvimento histórico deste conceito até os dias atuais. Assuntos relacionados ao que denominamos óptica, foram também levantadas nessas discussões, como a natureza e velocidade da luz.

A luz sempre foi um fenômeno enigmático, por apresentar duas faces distintas, tendo em alguns momentos uma e em outros outra, nunca as duas ao mesmo tempo. Talvez seja isto que causava tanta discussão envolta da pergunta: a luz é onda ou partícula? Este questionamento envolveu as mentes dos cientistas mais importantes do século XVII, como Christiaan Huygens, que se levanta como um dos mais importantes defensores da teoria ondulatória e Isaac Newton, o grande expoente da teoria corpuscular.

Quanto a velocidade da luz, alguns se posicionaram como sendo infinita e já outros consideravam finita. Posteriormente, com trabalhos experimentais, chegou-se à conclusão que a velocidade da luz era muito grande, porém, finita. Toda essa discussão também contribuiu para o avanço das ideias da Física e principalmente da Física Óptica.

Hoje sabemos que toda essa trajetória dos pensamentos sobre a luz e suas propriedades resultaram em considerações fundamentais para o entendimento sobre luz que temos hoje e para a formação dos pilares da Física Moderna. As discussões sobre a sua natureza culminaram na Mecânica Quântica e a sua velocidade inaugurou a Teoria da Relatividade Especial.

Poucos são os estudos historiográficos e filosóficos que analisaram a concepção da luz em várias épocas da história ocidental e oriental. Além disso, observa-se um grau de escassez de informação sobre os textos originais e de traduções para a língua portuguesa, contando com poucos trabalhos publicados em revistas de ensino e filosofia brasileiras.

### **Objetivo**

Dada a enorme relevância deste assunto, buscamos apresentar neste trabalho a evolução do conceito de luz e a sua interpretação ao longo dos séculos, com aspectos da história da ciência. Como uma forma de contribuir para o entendimento acerca do assunto, não abordamos o desenvolvimento analítico das ideias para facilitar tanto a leitura do trabalho aos estudantes de graduação, quanto aos professores que queiram inserir a Física Moderna no Ensino Médio, estimulando a leitura dos textos e diálogos dos principais cientistas, como meio de instigar o gosto pela Física.

Dentre os objetivos específicos, destacamos:

- Levantamento bibliográfico de fontes primárias originais, e traduções para o português, dos escritos e trabalhos científicos encontrados, a fim de contribuir também para a construção de um material voltado para o estudo do assunto.
- Retratar conceitos, ideias, paradigmas, fenômenos, métodos teóricos e experimentais atribuídos a luz.
- Reconstrução historiográfica das ideias e dos conceitos desenvolvidos para interpretar a luz.

### **Justificativa**

Acreditamos que a história da ciência é necessária para compreendermos os raciocínios elaborados, as etapas do processo de desenvolvimento de um conceito e as dificuldades encontradas pelos cientistas. Faz-se necessário que um futuro cientista saiba como a ciência é construída; mostrando a ele que as ideias científicas não se desenvolvem repentinamente, mas são resultados de um processo de amadurecimento e crescimento intelectual dos cientistas, ao passo que vão moldando suas ideias para conferi-las a maior fundamentação teórica e experimental possível. Além do mais, o processo de construção do conhecimento científico assemelha-se a uma teia multidirecional, visto que pode ser influenciada por aspectos científicos e extracientíficos (filosófico, sociológico, religioso, político).

Desta forma, a evolução das ideias ilustra de forma bastante clara como os caminhos empregados pela ciência são variados e imprevisíveis. Uma vez que a história dos fatos nos

possibilita perceber aspectos da formação cultural do mundo em que vivemos; entender como algumas ideias do senso comum foram superadas; conhecer a vida dos cientistas, as dificuldades encontradas, os erros, fracassos, acertos, experimentos realizados e eliminar alguns enganos históricos e científicos disseminados nos livros didáticos.

### **Metodologia**

Nesse trabalho realizamos primeiramente uma pesquisa exploratória, para proporcionar uma familiaridade com o tema e termos um panorama histórico geral. Depois realizamos uma pesquisa bibliográfica para uma seleção das leituras que havíamos destacado durante a pesquisa explanatória. Com base nisso, efetuamos uma pesquisa de caráter descritivo para verificarmos as relações entre os fatos históricos sobre os personagens que trataram acerca da luz; uma forma de visualizar o desenvolvimento histórico dos conceitos envolvidos neste assunto. O que influenciou na estrutura da monografia.

As fontes bibliográficas foram coletadas a partir das referências de livros e artigos, que tratavam acerca da histórias da luz ou em páginas web que abordassem o tema. A partir disso, fizemos um mapeamento dos personagens que contribuíram para o desenvolvimento do conceito de luz. Dessa forma, pesquisamos a bibliografia das respectivas personagens, que compreenderam as fontes primárias mais relevantes dos escritos ou artigos produzidos por eles. Adotamos o português em primeira instância e o inglês como segunda instância, caso não houvesse disponibilidade de tais materiais em português. Na análise desses documentos, consideramos os aspectos qualitativos das obras, buscando destacar elementos que retratassem sobre a luz e seus fenômenos.

### **Organização do trabalho**

Organizamos o trabalho mantendo uma linearidade temporal entre os fatos, que se estrutura da seguinte maneira: no presente capítulo, descrevemos as dimensões teórica da monografia como uma breve introdução ao tema. O segundo capítulo, destacamos pensadores e filósofos da antiguidade que abordaram em seus trabalhos, ideias sobre a luz e que de alguma forma puderam responder os questionamentos pertinentes à luz. No terceiro capítulo, apresentamos as ideias que fazem parte da nossa concepção moderna da teoria da luz. Nesse contexto, as teorias corpuscular e ondulatória são destacadas, assim como, as discussões sobre o éter, a velocidade da luz, a teoria de corpo negro, entre outros aspectos que contribuíram para o desenvolvimento da Física Moderna. Está subdividido em pares de personagens, para uma fácil contemporização e para uma melhor discussão dos fatos apresentados entre os séculos

XVII e as primeiras décadas do século XX. Já no capítulo quatro, realizamos um breve resumo das principais definições e conceitos que constroem a Física Óptica e que fazem parte do nosso entendimento sobre a luz e sua natureza, ou seja, onde todas as discussões e pensamentos nos levaram ao longo da história. Por último, no capítulo cinco são feitas nossas considerações finais.

Não pretendemos neste trabalho, detalhar o formalismo matemático dos tópicos envolvidos, nem mesmo nos aprofundar nestes assuntos, pois o foco deste trabalho está em mostrar que a Física não é somente uma ciência construída em fórmulas, ela é muito mais que isso. Assim, destacaremos apenas a construção das ideias sobre a luz, deixando claro a evolução deste conceito com o tempo.

Queremos ressaltar também que este trabalho, às vezes, toma um caráter mais descritivo (uma certa quantidade de citações diretas das obras), respeitando a ordem de apresentação das ideias, a fim de evidenciar o raciocínio desenvolvido pelo autor. Além disso, essas descrições apresentam-se como uma forma de organização da leitura do trabalho e de fazê-lo(a) compreender perfeitamente como se deu todo o processo de formação do conceito. Também, comentários se farão presentes ao entendimento dos textos sempre que se fizer necessário.

## 2 A PRÉ-CONCEPÇÃO DA TEORIA DA LUZ

Desde os primórdios da humanidade o ser humano sempre se preocupou em observar fenômenos da natureza, principalmente fenômenos luminosos naturais de grande dimensão e impacto como os raios, o fogo, o arco-íris, as estrelas, o sol e a lua. A luz sempre instigou o interesse humano de compreendê-la.

Sabia-se, conscientemente, que a noite era ausência da luz do Sol, e contrastando com esse aspecto, perceberam a existência de pontos brilhantes no céu escuro. Acredita-se que desde a antiguidade alguns indivíduos se perguntavam (semelhantes as indagações das crianças quando querem compreender algum fato) por que as estrelas brilham? Como vemos as estrelas? Por que não as vemos durante o dia? Como é produzida luz das estrelas? Como se propaga? Como a luz das estrelas chega até nós? E como a percebemos?

Ao tentar responder estes questionamentos, surgiam muitos outros: Como enxergamos as coisas? Como podemos ver o mundo que nos cerca? Por que não enxergamos no escuro? Que relação a luz tem com os olhos? O que acontece nos olhos que nos permite ver? Vem de fora ou está nos olhos? Será que enxergamos porque algo sai dos nossos olhos? Se for algo que chega aos olhos, o que será?

Aos poucos, o homem descobriu que do atrito de duas pedras surgiam faíscas, que podiam produzir a chama, da qual “brotava” a luz que tanto precisava. Assim, gradualmente, foi dominando a produção de fogo. Em consequência disso, percebeu-se que havia uma relação entre a luz solar e o fogo produzido, visto que ambos aquecem e iluminam. Logo, foi associado isto à visão, ao tentar explicar de forma simples, como vemos o mundo físico à nossa volta.

As primeiras tentativas de se explicar a luz e os fenômenos ligados a ela, foram através da mitologia e religião, os povos antigos se baseavam principalmente na religião para explicar tudo aquilo que não se sabia explicar.

Nesta primeira parte do trabalho apresentaremos um histórico sobre as primeiras ideias acerca da luz, com o objetivo de mostrar evolução deste conceito com o tempo. Reunimos nesta primeira parte do trabalho obras e documentos históricos que apresentam, aspectos de como surgiram os primeiros pensamentos para explicar a luz e seus fenômenos, em algumas partes do mundo antigo. Neste levantamento bibliográfico aqui apresentado, citamos algumas referências que não são encontradas em nossa língua e que não foram reunidas em um único trabalho anteriormente.

## 2.1 Do século VI a.C. ao século I a.C.

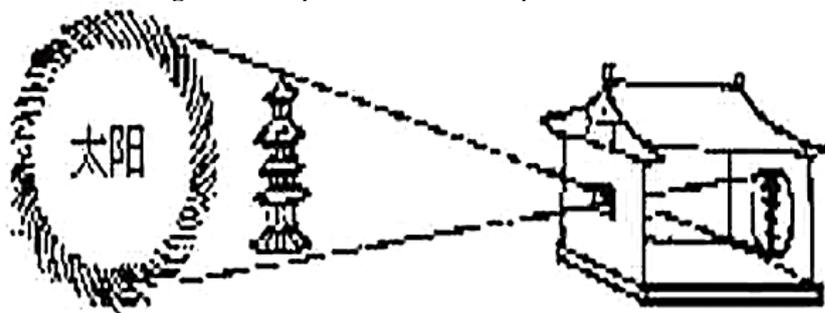
### Mozi<sup>1</sup> (490 a 405 a.C.)

Os primeiros pensamentos acerca da luz e suas propriedades da qual temos registros, se deu por Mozi, primeiro cientista chinês antigo e fundador da escola chinesa de grande importância em termos científicos e tecnológicos conhecida como Moísmo. Mozi descreveu um esboço dos conceitos básicos da propagação linear da luz e realizou experimentos relacionados a óptica geométrica. Mozi apresenta aspectos sobre a linearidade da luz, o aparecimento das sombras e produção de imagens em espelhos, no livro “*Mo Ching*”.

Em tradução realizada por Needham, Ling e Robinson (2004) foram apresentados alguns cânones do livro antigo de Mozi, os quais citaremos aqui os mais relevantes. Sobre as sombras, Mozi descreve-nos que ela não se move, apenas muda de lugar pelo movimento da fonte de luz; quando a luz chega, a sombra desaparece, se isso continuar, permanece indefinidamente (ZI, 2010, p. 487). Mozi também observou que a formação de duas sombras, que ele atribuiu a “duplicidade” das fontes, são formadas porque existe duas fontes distintas, pois, dois raios produzem sombra no ponto em que se cruzam (convergem).

Em um outro momento do seu livro, Mozi discute a formação de imagens produzidas pela câmera escura chinesa. Ele demonstra a inversão da imagem produzida pelo pequeno furo da câmera e acredita que este fenômeno ocorria pelo giro que a imagem fazia dentro do furo (ZI, 2010, p. 479), como ilustrado da figura 1. Detalhes do que Mozi analisou, são apresentados no Cânon 19 do seu livro:

Figura 1 - Esquema da camera de pinhole chinesa



Fonte: WU, LONG, *et al.*, 2015, p. 7.

<sup>1</sup> **Mozi** (também conhecido como Mo Tzu, Mo Di, Mo Ti, Mo Zi, ou Micius) viveu período da Guerra dos Estados Chineses entre 468 e 376 a.C. Ele foi um filósofo, pensador, cientista, engenheiro e estrategista militar. Ele difundiu o pensamento de “Amor Universal” e pressionou a monarquia chinesa por um estilo de vida simples. Suas muitas contribuições para as ciências naturais em mecânica, acústica, óptica e outros campos foram escritos no Livro do Moísmo [livro de Mo Ching/Mo Zi] escrito por ele e seus alunos (FRASER, 2015).

**19 Cãnon:** A imagem é invertida por causa da intersecção. O local de intersecção é um ponto. Isto afeta o tamanho da imagem. A explicação é dada pelo ponto.

*Explicação:* Uma pessoa iluminada brilha como se ela fosse atingida por flechas (raios). A parte inferior da pessoa se torna a parte de cima (da imagem) e parte superior da pessoa se torna a parte de baixo (da imagem). Os pés da pessoa (são enviados, como se fosse raios de) luz (alguma das quais são) escondidas abaixo (i.e., atinge abaixo do furo, mas outras das quais) formam sua imagem na parte de cima. A cabeça da pessoa (são enviados, como se fosse raios de) luz (alguma das quais são) escondidas acima (i.e., atinge acima do furo, mas outras das quais) formam sua imagem na parte de baixo. Numa posição muito perto ou muito longe (da fonte de luz, reflete no corpo ou imagem) há um ponto (o furo) que reúne (os raios) a luz, de modo que a imagem pré-formada (apenas do que é permitido passar pelo o lugar de coleta). (NEEDHAM, LING e ROBINSON, 2004, p. 82, tradução nossa).

Mozi comparava a luz com uma flecha que se move em linha reta, ou seja, ele se utilizava da comparação de tal fato para explicar, de forma indireta, a linearidade dos raios de luz. Temos, assim, uma das primeiras descrições da linearidade da luz. Essa descrição apresenta uma certa semelhança com as representações usadas nos livros didáticos atuais para explicar alguns fenômenos ópticos.

A reflexão da luz do Sol por um espelho foi atribuída por Mozi como a explicação da sombra que é formada entre uma pessoa e o Sol (ZI, 2010, p. 489), como podemos ver no cãnon 20 do seu livro:

**20 Cãnon:** Uma sombra pode ser formada pela reflexão (dos raios) do sol. A explicação é dada pelo ‘retorno’.

*Explicação:* (Se a luz (os raios) do sol é refletida (por um espelho plano perpendicular ao chão) na pessoa, a sombra (dessa pessoa) é formada (no chão) entre essa pessoa e o sol. (NEEDHAM, LING e ROBINSON, 2004, p. 83, tradução nossa).

A relação do tamanho da sombra com orientação do objeto, também foi discutida por Mozi, considerando se este está inclinado ou na vertical; a posição objeto em relação à fonte de luz, se está distante ou próximo. Variando desses fatores, ele descreve que a sombra se torna curta e larga (ampla) para o objeto inclinado, enquanto que, a sombra é longa e pequena (estreita) para o objeto na vertical. Quanto ao tamanho da fonte de luz, se é menor que o objeto, a sombra produzida é maior e vice-versa (ZI, 2010, p. 491), como vemos no cãnon 21:

**21 Cãnon:** Quanto ao tamanho da sombra – a explicação é dada tanto inclinado como um remo (i.e. não perpendicular na direção dos raios de luz), quanto na vertical (i.e., perpendicular na direção dos raios de luz); tanto longe quanto perto.

*Explicação:* Se a vara está inclinada, como um remo (não perpendicular aos raios de sol ou outra fonte de luz), sua sombra é curta e intensa. Se a vara está na vertical (perpendicular aos raios de sol ou outra fonte de luz), sua sombra é longa e fraca. Se a fonte de luz é muito pequena do que a vara, a sombra será maior do que a vara. Mas se a fonte de luz é maior do que a vara, a sombra será maior do que a vara. Quanto mais longe (da fonte de luz) a vara estiver, mais curta e escura será a sua sombra;

quanto mais perto (da fonte de luz) a vara estiver, mais longe e clara será a sua sombra. (NEEDHAM, LING e ROBINSON, 2004, p. 81, tradução nossa).

Nos cânones 22, 23 e 24 do *Mo Ching*, temos a causa e a explicação da formação das imagens em espelhos planos, côncavos e convexos (ZI, 2010, p. 493-495):

**22 Cânion:** De pé sobre um espelho plano e olhando para baixo, achará que sua imagem está invertida. (Se dois espelhos são usados) o maior (o ângulo formado pelos espelhos dentro do limite de  $180^\circ$ ) a menor (das imagens). A explicação é dada pela menor 'zona' (i.e., a distância entre as bordas livres dos espelhos, conseqüentemente o ângulo).

*Explicação:* Um espelho plano tem apenas uma imagem. Sua forma, contorno, cor, branco ou preto; distância perto ou longe; e posição, inclinada ou na vertical – todos dependem da (posição do objeto ou da) fonte de luz. Se dois espelhos planos estão colocados num ângulo, haverá duas imagens. Se dois espelhos planos estão fechados ou abertos (como se numa dobradiça), as duas imagens refletirão uma na outra. As imagens refletidas estão todas nos lados opostos (de onde o olho está). Uma pessoa refletida no espelho (acerta os seus raios de luz) num certo espelho-alvo, e onde quer que ele esteja (dentro do ângulo dos dois espelhos planos desde que seja menor do que  $180^\circ$ ) a imagem nunca é refletida. As imagens-alvo são numerosas (i.e., há muitas imagens) mas (o ângulo entre os dois espelhos) deve ser menor do que quando eles estavam originalmente na mesma linha (i.e.  $180^\circ$ ). As imagens refletidas são formadas pelos os dois espelhos separadamente.

**23 Cânion:** Com um espelho côncavo, a imagem pode ser menor e invertida ou larga e para cima. A explicação é dada por estar fora do centro de área (i.e., longe do centro da curvatura); e dentro do centro de área (i.e. do ponto focal até a superfície do espelho).

*Explicação:* (Primeiro: um objeto na) região entre o espelho e o ponto focal. Quanto mais próximo o objeto está do ponto focal (e, portanto, o mais afastado do espelho), mais fraca será a intensidade da luz (se o objeto está numa fonte de luz), e maior será a imagem. Quanto mais afastado o objeto está do ponto focal (e conseqüentemente, mais próximo do espelho), mais forte será a intensidade da luz (se o objeto está numa luz-fonte), e menor será a imagem. Em ambos os casos, a imagem estará para cima. A partir da borda da região central (ou seja, quase no ponto focal), e indo em direção ao espelho, todas as imagens serão maiores do que o objeto, e para cima. (Segundo: um objeto na) região fora do centro de curvatura e longe do espelho. Quanto mais próximo o objeto está do centro de curvatura, mais forte será a intensidade da luz (se o objeto está numa fonte de luz), e maior será a imagem. Quanto mais longe o objeto está do centro de curvatura, mais fraca será a intensidade da luz (se o objeto é uma fonte de luz), e menor será a imagem. Em ambos os casos, a imagem estará invertida. (Terceiro: um objeto na) região do centro (i.e. a região entre o ponto focal e o centro de curvatura). Aqui a imagem é maior do que o objeto (e invertida).

**24 Cânion:** Com um espelho convexo há apenas um tipo de imagem. A explicação é dada pelo 'o tamanho da forma'.

*Explicação:* Quanto mais próximo do objeto está do espelho, mais forte será a intensidade da luz (se o objeto está na fonte de luz), e maior será a imagem. Quanto mais distante o objeto está, mais fraca será a intensidade da luz (se o objeto é uma luz-fonte), e menor será a imagem. Mas em ambos os casos a imagem está para cima. Uma imagem dada por um objeto muito longe se torna indistinta. (NEEDHAM, LING e ROBINSON, 2004, p. 83-85, tradução nossa).

A discussão sobre os espelhos apresentada por Mozi, se apresenta coerente a época, pois os espelhos (de bronze) já existiam na época de Mozi. Segundo Ling An Wu e companheiros (2015, p. 9) os primeiros espelhos de feito bronze da china antiga são datados de 760 a.C., sendo encontrados no túmulo da rainha Liang do Estado de Guo (China Central), o que leva a mais de 200 anos antes de Mozi.

Outra discussão apresentada em seu livro foi sobre o problema da refração da água, no cânon 56:

**56 Cãnon:** O tamanho (aparente) de um espelho (em água) é tal que a parte submersa parece ser rasa. A explicação é dada pela 'aparência'.

*Explicação:* A parte submersa é (apenas) a aparência do espelho, conseqüentemente a superficialidade da parte submersa não é a superficialidade do próprio espelho. Se você compará-lo (você acha que a diferença entre a profundidade real e aparente é uma parte em cinco) (NEEDHAM, LING e ROBINSON, 2004, p. 83, tradução nossa).

Nos séculos seguintes, o Livro do Moísmo foi vítima de guerra e turbulência: a) final do período da primavera e outonos, uma reunificação turbulenta de 170 estado autônomos chinês; b) período dos estados combatentes, uma retomada do poder pela Dinastia Zhou Oriental. Nessa época o confucionismo dominou a China se tornando, durante certo, a doutrina filosófica do reino. E por causa disto, o progresso no campo da óptica na china se desenvolveu a um ritmo lento.

Paralelamente à intensa atividade filosófica e científica oriental, florescia no ocidente (mais especificamente na Grécia) movimentos filosóficos que se ocuparam em explicar a visão (o ato de ver), usando a luz como mediador do processo.

A filosofia grega, dentro do contexto histórico, pode ser dividida em duas partes: os filósofos que existiram antes de Sócrates (os pré-socráticos) e os que viveram depois dele. Os filósofos pré-socráticos são filósofos que escreveram muitas obras, mas não foram conservadas com o passar do tempo. As informações que possuímos sobre eles são de forma indireta, baseadas em descrições feitas por autores posteriores a Sócrates, chamado de doxografia (testemunhos), e pequenos trechos de seus escritos que foram citados por outros autores posteriores. Apesar disso, pouco se sabe sobre os seus ensinamentos. Temos apenas uma reconstrução dos pensamentos dos pré-socráticos, uma tentativa de descrição de tais pensamentos (MARTINS, 1996, p. 35).

### **Pitágoras<sup>2</sup> (cerca de 570 - 490 a.C.)**

Diogenes Laertius {c. 200-250 d.C.} (2008), em sua doxografia sobre Pitágoras, destaca que o Sol projeta seus raios através dos éteres. Para Pitágoras e seus discípulos, havia o éter frio, que era o ar e o éter denso que era o mar e tudo que é úmido, como descrito na citação abaixo:

(24) [...] Na *Sucessão dos Filósofos* Alêxandros diz que encontrou também nas *Memórias Pitagóricas* os seguintes dogmas pitagóricos. [...] Do sol se projeta um raio através do éter frio e do éter denso. Os pitagóricos chamam o ar de éter frio, e o mar e tudo que é úmido de éter denso. [...]. (29) [...]. Os sentidos em geral, especialmente a vista, são vapores muito quentes. Por isso se diz que vemos através do ar e da água; com efeito, o calor resiste ao frio. Se o vapor nos olhos fosse frio, dissipar-se-ia no ar, seu similar; por isso em uma de suas obras Pitágoras chama os olhos de portas do sol. (LAËRTIUS, 2008, p. 234-235, grifo nosso).

Podemos notar dois pontos interessantes na descrição acima. O primeiro destaca-se na existência de vários tipos éteres com propriedades próprias, a qual os pitagóricos supõem as suas existências, a fim de explicar a luz do sol atravessado pelo do ar e pela água. Isto nos remete a elementos da propagação da luz por materiais diferentes, quando diz que o sol projeta um raio que atravessa o ar e o mar. O segundo, o olho apresentava uma semelhança de uma lanterna, o qual o fogo interior era irradiado para fora como raio visual, passando pelo líquido aquoso do globo ocular, de maneira a iluminar o objeto que está sendo visto (BERNADO, 2009, p. 45).

### **Empédocles<sup>3</sup> (cerca de 495 - 435 a.C.)**

<sup>2</sup> **Pitágoras** (Πυθαγόρης – *Pythagóris*) foi um filósofo e matemático grego jônico e possível fundador do pitagorismo. Ele passou seus primeiros anos na ilha de Samos, ao largo da costa da Turquia moderna. Com a idade de quarenta saiu de Samos, quando a tirania de Polycrates chegou ao poder em 535 a.C., emigrando para a cidade de Croton (Crotona), no sul da Itália, onde a maior parte de sua atividade filosófica ocorreu lá. A maioria das informações sobre Pitágoras foram escritas séculos depois que ele viveu de modo que há pouca informação confiável sobre ele. Há uma variedade de histórias sobre sua morte, mas a evidência mais confiável sugere que a violência dirigida contra Pitágoras e seus seguidores em Croton cerca de 510 a.C., o levou a fugir para outra cidade grega no sul da Itália, Metapontum, onde morreu por volta de 490 a.C. Nenhuma fonte contemporânea de Pitágoras ou nos primeiros duzentos anos após sua morte, incluindo Platão, Aristóteles e seus sucessores imediatos na Academia e Liceu, cita as obras de Pitágoras ou dá qualquer indicação de obras escritas por ele existissem. (HUFFMAN, 2014)

<sup>3</sup> **Empédocles** (Εμπεδοκλής - *Empedoklís*) foi um filósofo, poeta, médico e pensador pré-socrático grego e cidadão de Agragas (Agrigento), na Sicília, caracterizado como ativo no lado democrático na política de sua cidade natal. É conhecido por ser o criador da teoria cosmogênica dos quatro elementos clássicos. Tradicionalmente, seus dois escritos são de forma poética em versos hexâmetros, intitulados “*Sobre Natureza e Purificações*”, sobreviveu até nós, em fragmentos preservados de citações nos trabalhos autores antigos. Suas teorias filosóficas e científicas são mencionadas e discutidas em vários diálogos de Platão, e eles figuram de forma proeminente nos escritos de Aristóteles sobre física e biologia e, como resultado, também nos comentários gregos posteriores sobre as obras de Aristóteles (PARRY, 2016).

Já Empédocles apresentava um posicionamento semelhante ao de Pitágoras (talvez influenciado por ele), no que se refere acerca do ato da visão, como descreve Aristóteles em seu livro “*De Sensu*”:

Como quando um homem, prestes a sair. Prepara uma luz e acende para si uma chama de fogo flamejante, de encontro a noite de inverno. Em uma lanterna cornear que protege de todos os ventos. Apesar de ele proteger do sopro dos sopradores de ventos, seu feixe se lança para fora, por ser muito mais fino, e com incansáveis raios que ilumina o céu: Assim que o fogo primitivo uma vez escondido na redonda pupila do olho, fechada por membranas e véus transparentes, por completo foram perfurados com poros divinamente moldados. E assim mantido fora da água profunda que as cerca, enquanto o fogo é lançado para fora, por ser muito mais fino {Aristóteles *De sensu* 2, 437b 23}. (LEONARD, 1908; BORNHEIM, 2000, p. 76; KIRK, RAVEN e SCHOFIELD, 2010, p. 323).

Observa-se que o olho é comparado com uma lanterna, semelhante a uma lamparina de querosene. Da mesma forma que uma lamparina de querosene apresenta internamente uma chama que é protegida pelo vidro. Assim o olho humano, segundo Empédocles, apresentaria a mesma estrutura, tendo internamente uma chama que é protegida por uma membrana, pelo a qual a sua luz atravessa para fora do olho (PARRY, 2016).

Empédocles também acreditava que no olho haveria um processo que recebia as imagens (fluxo de eflúvies) do objeto, trabalhando simultaneamente com os raios de luz que sai do próprio olho para percepção dos objetos. Uma descrição mais detalhada da ideia nos é fornecida por Platão no diálogo entre Sócrates e Ménon em seu livro “*Ménon*”:

**Sócrates:** Concordas então com Empédocles, em que as coisas que existem emitem certos eflúvies? **Ménon:** Sem dúvida. **Sócrates:** E que têm poros para os quais e através dos quais se deslocam os eflúvies? **Ménon:** Sim. **Sócrates:** E que de entre esses eflúvies, uns se ajustam a alguns dos poros, ao passo que outros são demasiado pequenos ou excessivamente grandes? **Ménon:** Assim é. **Sócrates:** E não é verdade que existe algo a que chamas vista? **Ménon:** E verdade. **Sócrates:** Com base em tudo isto, pois, compreende o que te digo, para usar as palavras de Píndaro: a cor é um eflúvio de formas, proporcionado com a vista e perceptível. **Ménon:** Esta tua resposta, Sócrates, é, a meu ver, excelente. **Sócrates:** Talvez seja aquela a que estás habituado. E ao mesmo tempo, suponho eu, crês que ela te porá em situação de dizeres também o que é a voz e o olfato e muitas outras coisas semelhantes. **Ménon:** Certamente que sim. {Platão *Ménon* 76c} (KIRK, RAVEN e SCHOFIELD, 2010, p. 324).

Além disso, Empédocles considerava que a iluminação do sol sobre os raios visuais seria uma condição necessária, porém, insuficiente para o ato da ver (visão) (BERNADO, 2009). Outra característica levantada por Empédocles sobre as propriedades da luz, foi sua análise acerca da sua velocidade, que para ele a velocidade da luz, apesar de muito grande, era finita (BERNADO, 2009, p. 398).

### **Leucipo<sup>4</sup> (século V a.C.)**

Leucipo afirmava que as percepções humanas eram de caráter tátil, pois a alma não podia atingir os objetos, sendo necessário que os objetos viessem tocar a nossa alma. Para isso os objetos deveriam emitir o que ele chamava de “*eidôla*” – uma espécie de imagens em forma de finas camadas, constituída de pequenos corpúsculos (átomos) que transportariam as informações de cor, tamanho, forma e outras qualidades dos corpos visíveis até nós pelo ar (BERNADO, 2009, p. 45).

Quanto ao tamanho das *eidolas*, elas podiam encolher, expandir e ser distorcidas à medida que passam por distâncias maiores ou menores, por estarem sujeitas a colisões com os átomos do ar. Além disso, se as *eidolas* que encolhessem suficientemente no tamanho da pupila, poderiam entrar no olho. Dessa forma, poderiam causar impactos nos órgãos sensoriais (BERRYMAN, 2016a). Percebe-se, portanto, que Leucipo utilizava-se da teoria de Empédocles, a qual os eflúvios, agora são descritos como imagens (*eidola*), emitidos pelos objetos que afetam os órgãos dos sentidos.

O termo *eidola* (εἰδωλα[-ων]) descrito aqui, só aparece nos escritos de Écio (século II d.C.) e Alexandre de Afrodísias (século II a III d.C.) quando se refere a Leucipo (KIRK, RAVEN e SCHOFIELD, 2010, p. 452). Nos escritos de Aristóteles (384-322 a.C.) e Teofrasto (371-287 a.C.) tal termo não é encontrado nas discussões sobre a teoria de Leucipo. No escrito “*República*” de Platão encontramos a raiz do termo *eide/eidos* (εἶδη/εἶδος), traduzido com “visão” e “percepção do aspecto exterior na sua extensão” (MURACHCO, 1998, p. 184), o qual, possivelmente, foi usado para criação do termo séculos mais tarde.

### **Demócrito<sup>5</sup> (460 - 370 a.C.)**

---

<sup>4</sup> **Leucipo** (Λεύκιππος – *Leukippus*) foi um filósofo grego que viveu durante o século V a.C. Sobre suas origens praticamente nada é conhecido, pode ter nascido em Elea, Abdera ou Mileto. Parece ter sido contemporâneo de Anaxágoras de Clazômenas e de Sócrates. Leucipo às vezes é dito ter sido o autor de uma obra chamada *A Grande Ordem do Mundo*. Talvez tenha escrito um segundo livro, que teria se chamado *Sobre o espírito*, mas este escrito pode ter sido apenas um capítulo da obra anterior. Leucipo é considerado o primeiro filósofo defensor do atomismo. (BERRYMAN, 2016b)

<sup>5</sup> **Demócrito** (Δημόκριτος - *Demókritos*) nasceu cerca de 460 a.C. de acordo com relatos antigos, (sendo, neste caso, contemporâneo mais jovem de Sócrates) e era cidadão de Abdera, embora alguns relatos mencionem Mileto. O trabalho de Demócrito sobreviveu apenas em relatos de segunda mão, às vezes não confiáveis ou conflitantes. Grande parte da melhor evidência é a relatada por Aristóteles, que o considerava um importante rival na filosofia natural. Diógenes Laertes lista muitos trabalhos de Demócrito em vários campos, incluindo ética, física, matemática, música e cosmologia. Duas obras, o *Sistema do Grande Mundo* e o *Sistema do Pequeno Mundo*, às vezes são atribuídos a Demócrito, embora Teofrasto relate que o primeiro é de Leucipo (BERRYMAN, 2016a).

Demócrito defendia a ideia de que um objeto visível emitia partículas, as quais chocavam-se em nos olhos formando as “imagens”, tornavam-se visíveis à nossa alma (BERNADO, 2009, p. 46), como descreve Teofrasto:

Demócrito explica a vista pela imagem visual, que ele descreve de uma maneira particular; a imagem visual não surge diretamente na pupila, mas é o ar existente entre o olho e o objeto da visão que, ao ser contraído, é marcado pelo objeto visto e pelo observador; pois todas as coisas estão sempre a emitir uma espécie de eflúvios. Por isso, este ar, que é sólido e de cores variadas, aparece nos olhos que são húmidos (?); os olhos não admitem a parte densa, mas a húmida passa através deles... {**Teofrasto de sensu 50a**} (KIRK, RAVEN e SCHOFIELD, 2010, p. 452-453).

Ou seja, a imagem visual na pupila é o resultado de eflúvios vindos tanto do objeto visto quanto do observador; estes, ao encontrarem-se, formam uma impressão sólida no ar, que então penetra na pupila. Além disso, a condição da membrana (ou seja, da pupila) pode interferir no ato de ver, visto que fatores fisiológicos poderiam facilitar ou não a passagem da imagem visual.

#### **Platão<sup>6</sup> (429? - 347 a.C.)**

Platão atribui explicitamente que a luz externa exerce um papel importante na mediação do ato de ver (visão), sendo essencial para a existência dos raios visuais (BERNADO, 2009, p. 46). Esse fato pode ser observado no diálogo entre Sócrates e Glauco em seu livro “*República*”:

[...] **Sócrates:** E a da visão e do visível, não pensas o de que ela carece? **Glauco:** Como? **Sócrates:** Existindo na vista a visão, e tentando o possuidor servir-se dela e existindo cores nas coisas, se não se fizer presente um [e] terceiro gênero, apropriadamente nascido para isso mesmo, tu sabes que a visão nada verá e as colorações serão invisíveis. **Glauco:** O que é isso de que estás falando? **Sócrates:** É claro que é o que chamas luz, disse eu. **Glauco:** É verdadeiro o que dizes, disse ele. **Sócrates:** Então, não é por uma pequena ideia que o sentido do ver e a faculdade de ser visto foram ligados por um liame mais valioso do que [508] os outros laços, se é que a luz não é sem valor. **Glauco:** Ao contrário, disse ele, falta muito para ela ser sem valor. **Sócrates:** Então, quem dos deuses no céu tu podes apontar como senhor disso, cuja luz faz a nossa visão ver o melhor possível e as coisas olhadas serem vistas? **Glauco:** É o que também tu, disse, e os outros chamam: o sol; pois é evidente o que estás perguntando. **Sócrates:** Logo, a visão está, de nascença, deste modo em relação a esse deus? **Glauco:** Como? **Sócrates:** A visão não é o sol, nem ela nem o em que ela nasce, o que nós chamamos vista [b] **Glauco:** Na verdade não. **Sócrates:** Mas, dentre os órgãos dos sentidos, ela é o que tem mais a forma do sol. **Glauco:** Muito mesmo. **Sócrates:** Então, também a capacidade que ela tem, ela a possui fornecida a partir dele, como derramada sobre ela? **Glauco:** É sim. **Sócrates:** Logo, também o sol não é visão, mas, sendo o causador dela, ele é visto por ela mesma. **Glauco:** É assim,

<sup>6</sup> **Platão** (Πλάτων – *Plátōn*) foi um filósofo e matemático do período clássico da Grécia Antiga, autor de diversos diálogos filosóficos e fundador da Academia em Atenas, a primeira instituição de educação superior do mundo ocidental. Nasceu em Atenas, provavelmente em 427-428 a.C., cerca de um ano após a morte do estadista Péricles, e morreu em 348 a.C. De acordo com Diógenes Laércio, o filósofo foi nomeado Aristocles, como seu avô, mas seu treinador de luta, Aristão de Argos, o apelidou de Platon, que significa "grande", por conta de sua figura robusta. De acordo com as fontes mencionadas por Diógenes, Platão derivou seu nome a partir da "amplitude" (*platytês*) de sua eloquência, ou então, porque possuía a fronte (*platýs*) larga. Juntamente com seu mentor, Sócrates, e seu pupilo, Aristóteles, Platão ajudou a construir os alicerces da filosofia natural, da ciência e da filosofia ocidental. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Plat%C3%A3o>. Acesso em: jan. de 2018.

disse ele. [...] **Sócrates**: Os olhos, disse eu, tu sabes que, quando alguém ainda não os dirige para aquelas coisas sobre as quais não incide a luz do dia, mas sobre as quais incide a claridade noturna, eles veem turvo e aparecem próximos de cegos, como senão houvesse uma visão limpa. **Glauco**: É evidente, disse ele. [d] **Sócrates**: E quando, creio eu, é sobre o que o sol espalha a luz, eles veem claramente e a visão se revela estar na própria vista {República VI 507b - VII 508d} (MURACHCO, 1998, p. 174-176).

### Aristóteles<sup>7</sup> (384-322 a.C.)

Para Aristóteles, a luz era um estado (propriedade) acidental de transparência que permitia o indivíduo detectar um objeto através do sentido da visão. A impossibilidade de se ver na escuridão era explicada devido ao ar que está entre o objeto e o observador não ser transparente, isto é, não possuir luz. Além disso, o Sol e os outros objetos luminosos estimulavam, o estado de transparência do ar ou de qualquer outro meio que separasse o objeto e o observador (BERNADO, 2009). Tais considerações de Aristóteles sobre a luz aparecem apenas nos livros de “*De Anima*” e “*De Sensu*”. Nas citações abaixo, destaca-se as principais ideias de Aristóteles descrita em *De Anima*.

[...]. O objeto da visão é o visível. Ora, visível é a cor e algo que, sendo embora descritível por palavras, não possui nome. [418b] (...) A cor não é visível, por esse motivo, sem luz<sup>8</sup>; pelo contrário, toda a cor de cada coisa é vista à luz. E é por isso que cumpre dizer, em primeiro lugar, o que é a luz. (...) A luz é, por sua vez, a atividade deste, isto é, do transparente enquanto transparente. (...) a luz não é fogo, nem, de todo, um corpo, nem uma emanção de algum corpo (já que, assim, seria também algum tipo de corpo); a luz é antes a presença, no transparente, do fogo ou de algo do mesmo tipo, porque não é possível dois corpos estarem ao mesmo tempo no mesmo lugar. (...) [419a] Nem todas as coisas visíveis o são à luz, mas apenas, de cada coisa, a cor que lhe é própria. Algumas coisas não se veem à luz, produzindo antes sensação na escuridão, como as coisas de aparência foga e brilhante (não existe um termo que as designe) (...). No que a isto respeita, fica claro, agora, que o que se vê à luz é a cor; por isso, a cor não se vê sem luz. E isto é o ser para a cor: é ser capaz de mover o transparente em atividade; e o ato do transparente, por seu turno, é a luz. Uma clara prova disto é que se se colocar um objeto colorido sobre o olho, ele não será visto. É, antes, a cor que move o transparente — por exemplo, o ar —, e este, sendo contínuo, move o órgão sensorial {*De anima* 418a-26 a 419a-25} (ARISTÓTELES, 2010, p. 80-82).

Acontece, então, ao som o mesmo que à luz: ora a luz reflete-se sempre, ou não haveria luz em todo o lado, e sim escuridão fora da zona alumada pelo sol. Mas ela não se reflete sempre da maneira como é refletida pela água, pelo bronze ou por qualquer

<sup>7</sup> **Aristóteles** (Ἀριστοτέλης - *Aristotélēs*) foi um filósofo grego, natural de Estagira, na Trácia (região macedónia, nordeste da Grécia), aluno de Platão e professor de Alexandre, o Grande. Seus escritos abrangem diversos assuntos, como a física, a metafísica, as leis da poesia e do drama, a música, a lógica, a retórica, o governo, a ética, a biologia e a zoologia. Em 343 a.C. torna-se tutor de Alexandre da Macedónia, na época com treze anos de idade. Em Atenas, Aristóteles criou sua própria escola em uma área de exercício público dedicada ao deus Apollo, de onde se chama, o Liceu. Ele se retirou diretamente para Cálcis, em Eubeia, uma ilha ao largo da costa do ático, e morreu por causas naturais no ano seguinte, em 322 (SHIELDS, 2016).

<sup>8</sup> As diferenças entre as coisas que soam manifestam-se claramente no som em atividade. É que, como sem luz não se vê as cores, sem som não se pode distinguir o agudo e o grave. {*De anima* 420a 26 a 29} (ARISTÓTELES, 2010, p. 85, grifo nosso).

outro objeto liso, isto é, de forma a produzir uma sombra, fenômeno pelo qual definimos a luz {*De anima* 419b 27 a 33} (ARISTÓTELES, 2010, p. 83-84).

### Epícuro<sup>9</sup> (342 - 270 a.C.)

Para Epicuro haveria filmes de matéria que estariam constantemente “descamando” da superfície dos corpos, os quais eram compostos de átomos. Essas “escamas-superfície” formavam uma sucessão de imagens, sendo responsáveis pela visão, a audição, o gosto e o cheiro. Epicuro foi também o primeiro filósofo a defender claramente a ideia de que a luz emitida por fontes, é refletida pelos objetos e que, entrando pelos olhos, produz a sensação visual (BERNADO, 2009, p. 48). Em sua carta a carta a Pitoclés, Epícuro traz explicações de fenômenos luminosos observados na natureza:

[94] (...). É ainda possível que a lua tenha luz própria, mas também é possível que a receba do sol. [95] Ainda no âmbito dos sentidos vemos muitos corpos dotados de luz própria e muitos que a recebem de outros; (...) [96] (...). Os eclipses do sol e da lua podem dever-se à extinção de sua luz, como observamos que acontece também nos fenômenos terrestres, mas podem ainda dever-se à interposição de outros corpos quaisquer ou da própria terra, ou de outro corpo celeste semelhante. (...) [101] Os relâmpagos também ocorrem de diversos modos: quando as nuvens se atiram e se chocam, dando origem àquele complexo de átomos que, produzindo fogo, gera o relâmpago; ou quando se libertam das nuvens sob a ação do vento partículas flamejantes capazes de produzir esse fulgor; ou quando esse fulgor é expelido para fora das nuvens, comprimidas por causa de seu próprio peso ou pela ação dos ventos; ou quando a luz difusa dos astros e contida nas nuvens, comprimida em certo momento pelas nuvens e pelos ventos, escapa através das próprias nuvens; ou quando filtra-se através das nuvens uma luz composta de partículas sutis (por meio dessa luz as nuvens se inflamam produzindo os trovões) e com seu movimento ocasiona o relâmpago; ou quando ocorre a combustão do vento em decorrência da intensidade do movimento e da violência da compressão. (...) [109] (...). O arco-íris forma-se quando o sol brilha sobre o ar úmido, ou por causa de uma união especial de luz e de ar que determina todas ou algumas propriedades de suas cores, e por causa da refração dessa luz o ar circundante toma as cores que vemos, segundo as várias irradiações da luz em direção às várias partes do ar. [110] Sua aparição em forma circular deve-se ao fato de nossos olhos perceberem de todos os pontos uma distância igual, ou ao fato de os átomos contidos no ar ou nas nuvens sofrerem por meio do próprio ar uma pressão capaz de determinar a forma circular. O halo em torno da lua forma-se quando de todas as partes o ar estende-se em direção à lua, ou quando o ar repele de modo regular as emanções provenientes da lua até imprimir uma forma circular à massa nebulosa sem separá-la completamente dela, ou ainda quando o ar (que se encaminha para a lua) repele simetricamente de todos os lados a parte do ar que já se acha na vizinhança imediata da lua até imprimir-lhe uma forma circular e compacta em volta de toda a lua. [111] Isso acontece quando em determinadas partes uma corrente exerce uma

<sup>9</sup> **Epícuro** (Ἐπίκουρος - *Epikouros*) foi um filósofo grego do período helenístico. Seu pensamento foi muito difundido e numerosos centros epicuristas que se desenvolveram na Jônia, no Egito e, a partir do século I, em Roma, onde Lucrécio foi seu maior divulgador. Ele foi criado em Samos, uma vez que os atenienses receberam parcelas de terra lá. Viveu na ilha até a morte de Alexandre, em 323, quando os atenienses foram expulsos de Samos, retornando a Atenas com dezoito anos. Epicuro deixou Atenas e se juntou a seu pai em Colofão (em 321), na costa do que é hoje a Turquia. Aqui estudou filosofia sob a tutela de Nausifanes, um filósofo democriteano com tendências cétricas. Retornar novamente a Atenas em 307/06, onde permaneceu até sua morte em 270, aos setenta ou setenta e um. Em Atenas, ele comprou a propriedade que se tornou conhecida como o "Jardim" e começou a desenvolver sua própria escola com seriedade (KONSTAN, 2016).

pressão violenta de fora, ou quando o calor acha poros propícios à produção desse efeito (LAËRTIUS, 2008, p. 305-308, grifo nosso).

### **Euclides<sup>10</sup> (Século III a.C.)**

Euclides prossegue com a ideia de Pitágoras de raios visuais, onde a luz é composta por raios que saem em linha reta dos (nossos) olhos, para detecção de objetos visíveis. Para ele, o olho humano funcionaria com um escaneador que analisava o objeto sequencialmente de um ponto a outro. Os raios visuais são descontínuos e a imagem completa do objeto, ao qual se vê, é ilusória. Euclides considera a existência dos raios luminosos provenientes das fontes de luz, ligando as fontes luminosas ao observador (o mesmo posicionamento de Empédocles). Reafirma também que a luz tem uma propagação retilínea. As considerações de Euclides aparecem no livro – “*Optica*” (BERNADO, 2009, p. 50).

A constatação da propagação retilínea da luz, atribuída a Euclides, poderia ter sido verificada e discutida muito antes entre os primeiros filósofos gregos, na Academia de Platão ou no Liceu de Aristóteles.

Uma curiosa experiência de refração é atribuída a Euclides e Arquimedes em seus textos, onde este fenômeno é relatado pela primeira vez. A experiência consistia em colocar uma moeda no fundo de um vaso com água, e ao observar a profundidade, a moeda parece encontrar-se em uma distância menor da que ela realmente estaria no vaso, na ausência de água (BERNADO, 2009, p. 57).

Embora os aspectos qualitativos da lei da refração pudessem ter sido descobertos pelos filósofos da Antiga Grécia, não se observa quaisquer tentativas destes para quantificá-la, ocorrendo apenas no século II da era cristã, onde se teve um importante e sistemático esforço com esse objetivo.

### **Tito Lucrécio Caro<sup>11</sup> (cerca de 98-55 a.C.)**

---

<sup>10</sup> **Euclides** (Εὐκλείδης - *Eukleidēs*) foi um professor, matemático platônico e escritor possivelmente grego, muitas vezes referido como o "Pai da Geometria". Não se sabe com certeza seu local de nascimento e morte, mas apenas que viveu durante o reinado de Ptolomeu Sóter (Ptolomeu I – entre 323 a.C. e 283 a.C.); por conseguinte, o pouco que se sabe é atribuído a Proclo e Pappus de Alexandria, que escreveram sobre Euclides séculos após sua morte. Além de sua principal obra, *Os Elementos*, Euclides também escreveu sobre perspectivas, seções cônicas, geometria esférica, teoria dos números e rigor. Escreveu ainda *Optica* sobre a óptica da visão e sobre astrologia, astronomia, música e mecânica, além de outros livros sobre matemática. Entre eles citam-se *Lugares de superfície*, *Pseudaria*, *Porismas*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Euclides>. Acesso em: jan. 2018

<sup>11</sup> Lucrécio (*Titus Lucretius Carus*) foi um poeta romano que viveu durante o primeiro século a.C. Ele é autor do poema filosófico *De Rerum Natura* (*Sobre a Natureza do Universo*), que expõem de forma abrangente uma visão do mundo epicurista. Muito pouco se sabe da vida do poeta, embora o senso de seu caráter e personalidade é evidente vividamente de seu poema. Seu épico é apresentado em seis livros e empreende uma explicação completa e completamente naturalista da origem física, estrutura e destino do universo (SIMPSON, online).

Durante o período romano houve poucos filósofos envolvidos com atividades culturais voltadas para ciências naturais, principalmente, aos fenômenos óticos e a suas aplicações. Destes podemos destacar Tito Lucrécio Caro, com a sua obra “*De Rerum Natura*”. Lucrécio relata poeticamente que não havia cores sem a participação da luz. Da mesma forma que há coisas sem cheiro, havia também objetos sem cor. Segundo Lucrécio (BERNADO, 2009, p. 111) “[...] as cores não podem existir sem luz e os átomos não são visíveis com a luz, pode então concluir-se que não são revestidos de cor”. Além disso, ele refuta a ideia de que os nossos olhos seriam as janelas para a mente observar os objetos visíveis e que, os nossos olhos captam as imagens (“eidola”) que se soltam dos objetos. Lucrécio nomeou-as de *species* (espécies), termo que foi usado pelos filósofos medievais europeus.

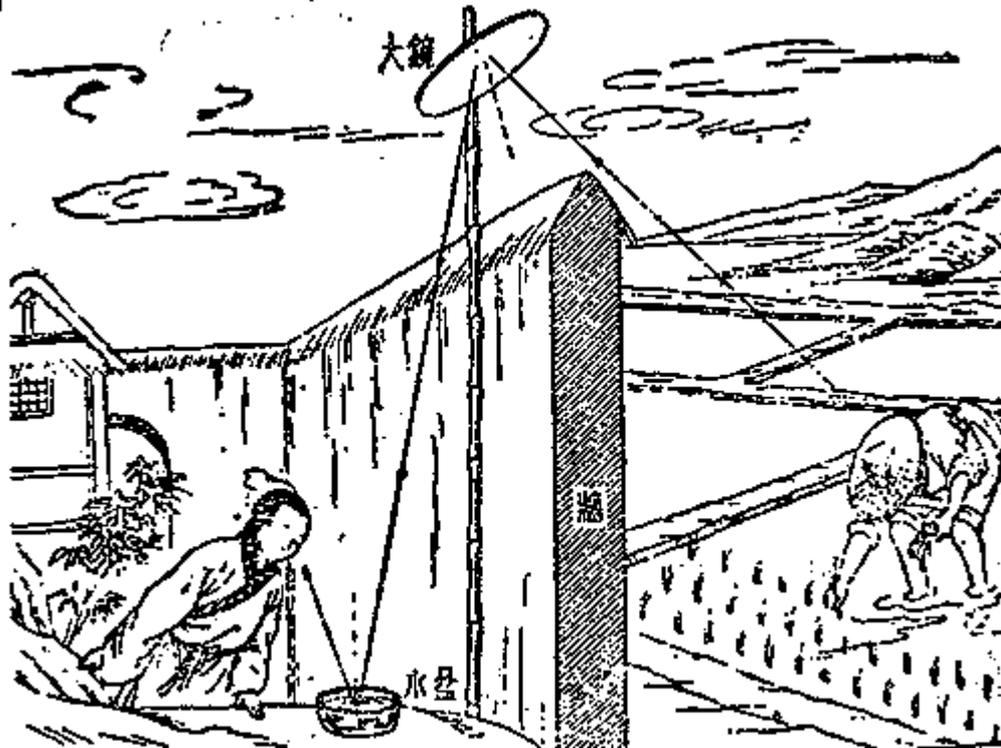
### **Liu An<sup>12</sup> (179-122 a.C.)**

Conforme o que foi apresentado anteriormente, o Livro do Moísmo foi vítima de guerra e turbulência ao longo dos anos. E por causa disto o progresso no campo da óptica chinesa se desenvolveu a um ritmo lento. Trezentos anos depois, no período da dinastia Han, o imperador Liu An descreveu em “*Huai-Nan Wan-Bi-Shu*” que “um grande espelho pendurado (acima de uma grande calha cheia de água), pode-se ver [atrás de uma parede], apesar de estar sentado, [...] [o lado de fora da parede e um proprietário poderia supervisionar seus servos trabalhando]” (WU, *et al.*, 2015, p. 9), ou seja, observa-se a primeira descrição do periscópio de vigilância e uso da reflexão da luz por múltiplos espelhos planos (figura 2).

---

<sup>12</sup> Liu An, rei de Huai-Nan, da dinastia Han Ocidental, era o neto de Liu Bang, o primeiro imperador da dinastia Han e o líder de uma revolta camponesa. Liu An era um mestre taoísta e um pensador. A grande contribuição de Liu An foi a compilação de dois livros: *Livro do Mestre de Huai-Nan* (ou os filósofos de Huainan) e *Huai-Nan Wan-Bi-Shu* (WU, *et al.*, 2015, p. 9).

Figura 2 - Esquema do periscópio chinês



Fonte: WU, LONG, *et al.*, 2015, p. 7

Em outra passagem do livro ele relata que “um pedaço de gelo é cortado na forma de uma bola redonda e mantido de frente para o sol. Pavio de erva é usado para receber o feixe brilhante do gelo, e assim o fogo é produzido” (WU, *et al.*, 2015, p. 9). Observa-se que na china as lentes de gelo convergentes já eram usadas para acender fogo, sendo um costume bem antigo entre os chineses.

Já no “*Livro do Mestre de Huai-Nan*”, outro livro de sua autoria, ele descreve o processo de acender o fogo com a “lente” de gelo: “É como colecionar fogo com um espelho queimador. Se (o foco for colocado) ‘muito longe’, (o fogo) não pode ser obtido. Se (o foco for colocado) muito perto, o ponto central não será (seja atingido). Deve estar exatamente entre ‘muito distante’ e ‘muito próximo’.” (WU, *et al.*, 2015, p. 9).

## 2.2 Do século I ao século VII

### Herão de Alexandria<sup>13</sup> (cerca de 65-125 d.C.)

<sup>13</sup> Herão de Alexandria (*Heron*), se sabe pouco principalmente de sua vida. Ele foi geômetra e invento do aelipilo, mecanismo que transformava energia térmica em energia cinética. Ele escreveu sobre mecânica, geometria, topografia, astronomia e óptica {uma tradução latina de sua obra que erroneamente foi atribuída a Ptolomeu} (BERNADO, 2009, p. 111-112).

No Egito, Herão explicava a visão presumindo que os raios que saíam dos olhos se propagavam em linha reta e com velocidade infinita, pois para ele, ao abrir os olhos na direção do céu, ver-se imediatamente as estrelas do firmamento, as quais estão infinitamente distantes. Além disso, ele acreditava que os raios da luz e do calor eram partículas de matéria com propriedade de penetrar entre os espaços deixados pelas partículas que constituem o ar e a água. Herão fez estudos sobre a reflexão em espelhos planos e curvos, com base no princípio de que a luz indo de um ponto a outro, depois de sofrer uma reflexão no caminho, o faz em uma distância mais curta possível (BERNADO, 2009, p. 112).

### **Claudio Ptolomeu<sup>14</sup> (cerca de 85-165 d.C.)**

Ptolomeu acreditava que os raios visuais batem numa superfície sem se interagir com ela, a não ser que haja luz externa. Quanto mais forte for a luz externa, melhor é a interação entre raio visual e os tipos de raios (como os raios de sol, fogo e etc.), e maior será a eficácia do raio visual no transporte das *chroma* (características luminosas) da superfície. A sua teoria sobre a visão apresenta uma semelhança com a de Euclides, do ponto de vista da linearidade da luz e os raios visuais vindos das fontes luminosas.

No livro “*Optica*<sup>15</sup>”, Ptolomeu descreve os fenômenos ópticos, cuja edição original constava de cinco livros. No último livro ele descreve as primeiras experiências conhecidas para determinar a lei da refração. Ptolomeu, usando-se um rigoroso método experimental, esteve perto de estabelecer uma lei quantitativa para a refração, através de medições dos ângulos de refração em função dos ângulos de incidência para diferentes interfaces transparentes. Ideias preconcebidas impediram o sucesso da sua tentativa, pois nas interfaces entre ar e água, ajustou os valores medidos para valores previstos por uma regra matemática que era considerada correta na época. Tal fato, mostra que ele “tentou” comprovar uma lei pré-estabelecida de relação constante entre o ângulo incidente e o ângulo refratado que havia na sua época. Com os resultados das experiências, elaborou uma tabela de refrações para o vidro, cujos valores são próximos dos vidros fabricados atualmente (BERNADO, 2009, p. 112-115).

---

<sup>14</sup> Claudio Ptolomeu (*Claudius*) nasceu em Ptolomais Hermiou no Alto Egito, mas que aparentemente viveu em Alexandria onde trabalhou. Não se tem detalhes de sua existência, mas presume-se que pode ter estudado com Teon de Esmirna. Ele foi confundido pelos estudiosos medievais, sendo apresentado como descendente da Dinastia Ptolomaica do Egito. Em suas ilustrações Ptolomeu era mostrado usando uma coroa (RONAN, 1997a, p. 128-129).

<sup>15</sup> O trabalho de Ptolomeu referente aos fenômenos ópticos apareceu publicado na sua *Optica*, cuja edição original constava de cinco livros. Desta obra resta apenas a versão latina, tradução de uma versão árabe (BERNADO, 2009, p. 115).

Paralelamente à intensa atividade filosófica de Alexandria, florescia na Índia um interessante movimento filosófico que se ocupou em explicar a luz e os seus fenômenos de forma racional.

### **Aksapada Gautama<sup>16</sup> (século I a II)**

Para Gautama os objetos não emitem raios luminosos de si mesmos, existindo apenas os raios emitidos pelos olhos que são responsáveis pela visão (BERNADO, 2009, p. 115). Em seu livro “*Nyaya Sutra*”, que consiste em cinco livros com dois capítulos cada, aborda regras da razão, lógica, epistemologia e metafísica em forma de sutras aforísticos<sup>17</sup>. Gautama filtrou e sistematizou o conhecimento lógico da antiga tradição védica<sup>18</sup> transformando-o em um manual condensado de regras curtas, “sutras”, para serem lembradas, referenciadas e transmitidas de uma geração a outra. Além disso, a filosofia Nyaya se tornou uma escola tradicional de lógica hindu, onde os seguidores comprometeram a descrever o mundo de maneira racional e coerente, sem depender da revelação ou do compromisso com qualquer divindade em particular (CLOONEY, 2001). O capítulo três do *Nyaya Sutra* aborda sobre os objetos do conhecimento. Sobre a luz e visão, Gautama destaca no capítulo 1 que:

41. O raio do olho não é percebido em consequência de sua falta de visão, mas não por causa de sua ausência total, porque atinge os objetos com a ajuda da luz externa. [...].
43. Deve haver um raio no olho do homem como o vemos nos olhos dos animais que se movem durante a noite.
44. Alguns dizem que o olho pode perceber uma coisa, mesmo sem entrar em contato com ela por meio de seus raios, assim como as coisas que nos são exibidas pelo vidro, mica, membrana ou cristal são vistas.
45. A objeção anterior não é válida, porque nós não podemos perceber o que nos são exibidos pelas paredes.
46. Existe um contato real, porque não há obstrução real (causada pelo vidro, pela mica, pela membrana ou pelo cristal).
47. Um raio do sol não é impedido de chegar a uma substância inflamável/combustível, embora o último seja selecionado por um cristal. [...].
49. Em resposta, dizemos que a percepção de uma coisa exibida por um cristal ocorre da mesma forma que um espelho ou água devido à posse do caráter de transparência. (*Nyaya Sutras Livro 3 capítulo 1 sutra 30 a 49*) (GOTAMA, 1913, p. 70-75, tradução nossa).

<sup>16</sup> Aksapada Gautama (Gotama, Dirghatapas. Medhatithi Gautama) é conhecido como o possível autor de *Nyaya Sutra*. Não se sabe ao certo quem realmente foi Gautama. Muitos estudiosos indianos têm procurado identificar o autor de *Nyaya Sutra*. Infelizmente, o nome Gautama era comum na Índia e vários indivíduos com tal nome existiram entre os séculos VI a.C. e II a.C.; Aksapada é o nome mencionado no livro *Ramayana* de Valmiki, sendo natural de Mithila (POTTER, 1995, p. 220-221).

<sup>17</sup> É qualquer forma de expressão sucinta de um pensamento moral. Geralmente se apresenta em um texto breve que enuncia uma regra, um pensamento, um princípio ou advertência. Sinônimo de ditado, máxima, adágio, provérbio.

<sup>18</sup> Civilização védica foi uma sociedade hindu que se desenvolveu entre 2000 a 1000 a.C., cuja a literatura do foi escrita em Sânscrito Védico. A maioria as obras vedas eram transmitidos de forma oral de mestre para aprendiz.

Um fato curioso que podemos apontar sobre os pensamentos de Gautama, é que ele explicava a existência dos raios visuais, com base no brilho que certos animais possuem nos olhos quando se movem durante a noite. Ele também ressaltava a necessidade de uma fonte luminosa externa, para que o raio do olho consiga atingir os objetos e a percepção das coisas através de meios transparentes.

### **Vatsyayana<sup>19</sup> (séculos IV-V d.C.)**

Vatsyayana no seu livro “*Nyaya Bhasya*”, o mais antigo e completo comentário do *Nyaya Sutra* que sobreviveu na era moderna, faz comentários que expandiram, expuseram e discutiram os sutras de Gautama. Sobre a aprendizagem do mundo pelos raios visuais, ele descreve que:

De fato, a "apreensão de coisas grandes e pequenas" é provocada pela peculiaridade do contato entre os raios de luz que emanam do órgão visual e o objeto percebido; assim como existe contato entre os raios de luz da lâmpada e do objeto.

Aquele que há tal contato entre os raios de luz (do órgão visual) e o objeto percebido é provado pelo fenômeno da obstrução; isto é, quando os raios de luz que emanam do olho são obstruídos por coisas como a parede e semelhantes interagindo entre o olho e o objeto, eles não iluminam (e tornam perceptível) esse objeto; isso é exatamente o que acontece no caso da luz que emana de uma lâmpada (JHA, 1984, p. 1189, tradução nossa).

Podemos observar que a ideia de contato é a causa da percepção dos objetos, sendo justificada pela ideia de obstrução dos raios, pois implica no objeto não sendo iluminado, tornando-o invisível para o observador. Isso prova que, para perceber os objetos, o contato da luz diretamente com este é essencial, pois se não houvesse, a percepção não seria obstruída por um objeto intermediário.

Vatsyayana comenta como a cor é percebida e como ocorre essa percepção:

O "caráter particular da cor" – por causa da presença de cor (e substâncias coloridas) são percebidas, e por causa da ausência, uma substância (dotada de cor) não é percebida – consiste no que foi chamado de "caráter manifestado". É por esta razão (de perceptibilidade dependendo da manifestação da cor) que o raio de luz do olho, com a sua cor não-manifestada, não é percebido com os olhos [e certamente essa não percepção não provou que o raio não é excelente] (JHA, 1984, p. 1195, tradução nossa).

ou seja, Vatsyayana destaca que a cor é resultado de um caráter (propriedade) de manifestação do objeto. Quando há a manifestação do caráter a cor é vista. Quando não há manifestação nenhuma cor é vista (transparência). Isto justifica o fato de os raios visuais não serem visíveis,

---

<sup>19</sup> Paksilasvamin Vatsyayana (Dramila/Dravida), segundo Vacaspati Misra é o nome do autor de *Nyaya Bhasya*. No entanto, é as vezes é chamado de Dramila ou Dravila, conforme Vidyabhusana, sendo originário do sul da Índia. Ele pode ter vivido no século III d.C. ou no século V d.C. {mais provável} (POTTER, 1995, p. 239).

pois não possuem esse caráter manifestado. Ele também destaca características interessantes, ao mesmo tempo importantes, sobre a luz:

Com relação a luz, descobrimos que ela possui uma diversidade de características: a) às vezes tem a cor e o toque manifestados, como nos raios do Sol (que é percebido pela visão e pelo tato); (b) em alguns casos tem a sua cor manifestada, mas toque não é manifestado; como nos raios de luz da lâmpada (que são percebidos pela visão); (c) em alguns casos tem o seu toque manifestado e a cor não é manifestada, como luz em contato com a água (aquecida) e outras coisas (que é percebida apenas pelo tato); e (d) em alguns casos, ela tem a cor e o toque não-manifestados e, como tal, não é perceptível, tanto pela visão quanto pelo tato, como por exemplo, os raios de luz que emanam dos olhos (JHA, 1984, p. 1195, tradução nossa).

Vemos há uma categorização das causas fenomenológicas da luz, o que levaria ao início de uma teoria sobre a luz bem fundamentada para época, o que de fato não ocorreu. Percebe-se que isto é resultado de uma reflexão profunda de observações físicas desses fenômenos, que são bem sutis, como podemos ver na descrição.

Em outro comentário, Vatsyayana justifica o porquê do raio visual, mesmo à noite, não ser visto:

É somente quando o órgão visual [(olho)] é auxiliado por alguma luz externa que se torna capaz de perceber; e na ausência de tal luz, não existe qualquer percepção pelo órgão visual. [Assim que é por causa da ausência de uma luz externa caindo em cima dele que a luz visual não é percebida]. Por uma questão de fato, mesmo com a presença da luz (externa) e também a existência de percepção pelo fresco toque, o objeto em que esse toque está, (isto é, as partículas de água suspensas na atmosfera) deixa de ser percebido pelo olho; pela simples razão de que a sua cor não está sendo manifestada; isso mostra que existe a não-percepção de um objeto dotado de cores devido à sua cor não ser manifestada. [...] (JHA, 1984, p. 1204, tradução nossa).

Portanto, a luz externa exerce um papel fundamental na percepção do objeto pelo olho humano, ou seja, o raio visual só funciona com a presença de luz externa. Neste comentário, torna-se evidente a existência de dois tipos os raios: os raios de luz e os raios visuais.

Vatsyayana argumenta sobre a percepção de luz nos olhos de alguns animais noturnos que “por uma questão de fato, nós realmente vemos raios de luz nos olhos dos ‘andarilhos noturnos’ - ou seja, o gato e outros animais (da espécie felina); e a partir disto podemos inferir a existência de luz nos olhos dos outros seres vivos” (JHA, 1984, p. 1206, tradução nossa). Isto era visto como uma forma de confirmar a existência dos raios visuais.

Sobre a percepção de algo sem entrar em contato por meio dos raios visuais, Vatsyayana afirma que

Por uma questão de fato, descobrimos que quando um pedaço palha que está voando atinge o vidro ou o vapor, é realmente visto pelo olho, e ainda pode entrar em contato com outro somente quando não há uma terceira coisa vem entre eles, e sempre que uma terceira coisa está entre duas coisas seu contato é obstruído. Sendo assim, se o contato dos raios de luz (do olho) e o objeto (a palha atrás do vidro) forem a causa de

sua percepção que, nenhum contato é possível em virtude da obstrução (pela intervenção do vidro), não deveria existir percepção total, e ainda assim nós percebemos coisas escondidas atrás de um vidro, vapor e cristal de rocha; tudo isso para provar que os órgãos dos sentidos são operacionais sem realmente entrarem em contato com o objeto (JHA, 1984, p. 1208-1209, tradução nossa).

Vemos aqui uma outra análise fenomenológica da luz, onde o grau de transparência não afeta a percepção dos objetos pelo corpo transparente. Essa percepção é vista como incomum, pois os raios visuais não estariam em contato direto com o objeto, sendo interrompida no vidro e ainda assim é visto. No entanto, no sutra 46, vemos a explicação do contato dos raios visuais no objeto, que “por uma questão de fato, nem vidro nem vapor obstrui a passagem dos raios de luz do olho; e não sendo obstruído, os raios entram em contato com o objeto” (JHA, 1984, p. 1210, tradução nossa).

Vatsyayana reforça ainda mais a ideia de que tanto os raios visuais quanto os raios de luz, não são impedidos de passar por objetos transparentes, em três observações:

[...] a frase do Sutra é para ser dividida em três cláusulas pela interpretação do termo ‘porque não há obstrução alguma’, ‘*avighatat*’, com cada um dos outros três termos; e o significado atribuído ao sutra é de acordo com esta construção.

(a) Os raios do Sol não são impedidos por um frasco de vidro e semelhantes, - ‘como não há alguma obstrução’ neste caso; e a água no frasco torna-se quente; tal absorção da característica de calor de um (luz) pelo outro (isto é, água) só é possível quando há contato real (entre as duas coisas); e a temperatura original (da água) torna-se suprimida pelo calor absorvido.

(b) Quando o objeto a ser iluminado está escondido por detrás do cristal de rocha, não existe qualquer obstrução para os raios da lâmparina que incidem sobre ela; e ‘porque não há alguma obstrução’ o objeto é alcançado pela luz, torna-se percebido.

(c) Quando alguma coisa é colocada numa panela posta no fogo, torna-se queimada pela luz do fogo; e também ‘porque não há nenhuma obstrução’ para os raios de luz, o objeto é alcançado por eles, e por causa disto torna-se queimado; e o calor (da luz) está operando apenas pelo contato (JHA, 1984, p. 1211, tradução nossa).

Ele também comenta sobre o fator de transparência ser a causa da percepção dos objetos pelos corpos transparentes, tais como espelho e água, os quais possuem uma relação com a reflexão:

O espelho e a água são possuídos de ‘*prasada*’ - isto é, uma cor especial (branco-brilhante); a qual pertence a eles pela sua própria natureza; como é demonstrado pelo fato de sempre possuí-la; e desta ‘cor branco-brilhante’ também está na própria natureza refletir (e torna visível) as cores (de coisas colocadas antes dele); e, no caso do espelho, descobrimos que quando um homem coloca seu rosto, antes dele, os raios de luz que emanam de seus olhos atingir o espelho e eles retornam (refletem), e, assim, eles entram em contato com o próprio rosto do homem, cuja cor e forma tornam-se percebidas; esta percepção é chamada de ‘a percepção da imagem refletida’; e é provocada pela a cor peculiar da superfície do espelho; que por isso é provado pelo fato de que qualquer reflexão não aparecem quando há uma deterioração do brilho da superfície do espelho. [Embora tal é o caso com o espelho, ainda] não existe tal ‘percepção da imagem refletida’ no caso do muro e semelhantes [...] (JHA, 1984, p. 1214-1215, tradução nossa).

Observa-se que o espelho e a água têm uma cor especial e é essa característica que dá a propriedade de refletir as cores. Quanto ao espelho, ver-se descrição da formação de imagens aplicada à ideia de raios visuais, de forma que os raios visuais são refletidos pelo espelho e entram em contato com o rosto dando a impressão de ver o próprio rosto projetado no espelho. Isto, segundo Vatsyayana, é causado pela cor peculiar do espelho.

### **Uddyotakara<sup>20</sup> (século VII)**

Uddyotakara na sua obra “*Nyaya-Varttika*”, faz um comentário da obra de Vatsyayana. Seu comentário é baseado em um novo desenvolvimento da lógica, proposta pelo lógico budista Dinnaga e outros, onde ele refutou os pontos de vista e os argumentos de Vatsyayana. Uddyotakara deixa bem claro a existência do contato entre os raios de luz e o objeto, como ele mesmos justifica:

Que existe um contato entre os raios de luz e o objeto é provado pelo fenômeno da obstrução – diz Bhasya. Essa obstrução é devida ao fato de que coisas como a parede e similares não são da natureza de luz (não são transparentes). Se os órgãos do sentido pudessem operar sobre as coisas (tornando-as perceptíveis) sem realmente chegar a elas, coisas como a parede e semelhantes não poderia ter o poder de obstruir (sua operação); portanto, concluímos que os raios de luz emanam do órgão visual, assim como fazem com a lamparina (JHA, 1984, p. 1190-1191, tradução nossa).

Ele comenta que a manifestação de cor é um efeito particular e que não está presente nos raios de luz emanado dos olhos:

A “manifestação” (de uma qualidade, como a cor) é inferida a partir do seu efeito; ou seja, manifestação está nesse caráter particular, em virtude da ausência da substância aquosa e da substância luminosa (suspensa na atmosfera) com suas partículas componentes em contato, não são percebidas no inverno e verão, respectivamente, e por causa da presença dos raios de luz da lâmpada e do Sol são percebidos. E na medida em que este 'caráter particular' de cor não está presente nos raios de luz emanados dos olhos, esses raios não são perceptíveis pelos olhos (JHA, 1984, p. 1196, tradução nossa).

Na discussão sobre as propriedades de cor e toque atribuídos nos fenômenos luminosos, vemos alguns aspectos dos raios visuais que, de alguma forma, não foram discutidos pelos gregos.

#### **Primeiro aspecto:**

Diz o Bhasya – O fato de que a cor e toque {desta luz no órgão visual} não são manifestados é deduzida de (e assumiu com base) certos usos bem conhecidos. Se a luz visual tivesse a sua cor manifestada, então, no momento em que vários desses raios

---

<sup>20</sup> Uddyotakara Bharadvaja (Pasupatacarya) era oriundo de Srughna, uma cidade de Punjab a oeste de Jamuna e ao norte de Thaneshvar. Ele se autodenominava de “Pasupatacarya”. Segundo Ganganatha Jha, o nome “Bharadvaja” é especificado por Vacaspati Misra, indicando que pertencente à família Bharadvaja. Ele viveu entre os séculos VI-VII d.C. e é autor do livro *Nyaya Varttika* (POTTER, 1995, p. 303).

de luz incidissem em qualquer objeto a ser percebido, esse objeto seria queimado [como no contato com o fogo; a qual é a única luz em que a cor é manifestada]; e quando vários raios de luz incidissem sobre o objeto e todos ao mesmo tempo, (sendo substâncias com cor manifestada) levaria a ocultação do objeto, e o objeto deixaria de ser percebido (JHA, 1984, p. 1199, tradução nossa).

Observa-se que os raios visuais, caso tivesse a sua cor manifestada, queimariam os objetos quando fossem direcionados as eles, pois o fogo era o único elemento que apresentava cor (e toque) manifestado em sua concepção. Este processo assemelha-se muito ao funcionamento dos raios lasers que são usados para queimar superfícies. Além disso, os raios visuais ocultariam os objetos, o que seria possível. Se pensássemos no caso da lente convergente, em um ponto próximo do foco, onde vários raios de luz incidem – veríamos sim uma “ocultação do objeto”, mas no sentido de “um objeto extremamente iluminado”, não conseguindo ver seus detalhes.

Segundo aspecto:

Talvez você argumentaria como o seguinte - “Quando os raios do Sol incidem sobre um objeto, não obstrui os raios de luz emitidos do olho perceptor (e o objeto não deixa de ser percebido); e, do mesmo modo, não seria necessário a obstrução dos raios visuais pelos vários raios de luz incidindo sobre um objeto (o qual não deixaria de ser percebido). Mas isso não está certo; a percepção é provocada após a perfuração; ou seja, no exemplo citado, o que acontece é que os raios de luz emitidos do olho atravessam dos raios solares e em seguida conectam-se com o objeto (JHA, 1984, p. 1199, tradução nossa).

Uddyotakara comenta que a luz que está iluminando o objeto por alguma fonte luminosa, não interfere na percepção do objeto. Isto ocorre por que os raios visuais “furam” os raios de luz (no caso solares) ou seja, eles atravessam a luz incidente e estabelece ponte para percepção.

Terceiro aspecto:

No que diz respeito a luz visual, no entanto, se a sua cor e toque tivesse sido manifestada, então os raios de luz do olho de uma pessoa que tem incidência num objeto, ficaria escondido nesses raios (os quais tem a sua cor e toque manifestos, não sendo transparente), e não seria percebido por qualquer outra pessoa (JHA, 1984, p. 1199, tradução e grifo nosso).

Neste caso, se os raios visuais tivessem toque (além da cor) o objeto ficaria ofuscado pelos raios visuais, ou seja, a característica de toque afetaria a percepção de outra pessoa (caso esta esteja observando o mesmo objeto), impedindo que seus raios visuais chegassem no objeto.

Uddyotakara traz uma argumentação clara do porquê raio visual não ser visto, mesmo à noite:

[...]. Qualquer coisa que necessita de luz externa (para a sua percepção), tem a sua não-percepção devido à não-manifestação de cor; por exemplo, no caso da substância líquidas que tem as suas partículas componentes de forma compacta, {isto é, a água-molécula), existe a não-percepção porque a sua cor não é manifestada; Da mesma

forma, a luz visual também tem necessidade de luz externa, a sua não-percepção também deve ser devido ao não-manifestação de sua cor (JHA, 1984, p. 1205, tradução nossa).

Ou seja, para Uddyotakara um corpo que necessite de luz externa, não tem a sua cor manifestada, o que anula a sua percepção pelo os olhos. Como é no caso da água e dos raios visuais, por necessitarem da luz externa, não possuem a manifestação de cor, tornam-se imperceptíveis aos olhos. Desta forma, explica porque os raios visuais não são vistos nem de dia e nem a noite.

Uddyotakara exprime a mesma opinião de Vatsyayana sobre contato dos raios visuais no objeto através de corpos transparentes: “Nem o vidro e nem o vapor obstruir os raios de luz; e não sendo obstruídos, eles passam dentro (do vidro ou do vapor) e entram em contato com o objeto (escondido atrás do vidro ou do vapor)” (JHA, 1984, p. 1210, tradução nossa). Sobre a natureza da transparência, ele afirma que é a causa da percepção dos objetos pelos corpos transparentes:

[...] o espelho e água são dotados de *‘prasada’*, ou seja, uma cor particular; e esta cor constitui a própria natureza destas coisas, porque é sempre encontrada neles. “Qual é o significado da cor em particular pertencente (ao espelho e a água)?” Isso significa que subsiste nessas coisas, sem elas estarem em contato com qualquer outra substância. É também a propriedade da própria cor em particular que é capaz de fazer a cor visível, e isso constitui a sua própria natureza; ou a *‘natureza’* (o significado para Bhasya) que consiste na cor subsistindo em coisas como água e similares. Na medida em o espelho e a água são dotados com as características de *‘prasada’*, quando a luz visual atinge essas coisas, ela se vira e entra em contato com o rosto do homem; e uma vez que a luz (portanto refletida) entra em contato com todo o rosto, o reflexo do rosto é visto junto com todas estas coisas; por exemplo, o homem que pode estar de pé diante da aparência de homem (JHA, 1984, p. 1215, tradução nossa).

Vemos que esta cor particular é da própria natureza do espelho e da água, dando a eles a propriedade das cores se tornarem visíveis, ou seja, a cor se torna evidente neles. Em outras palavras, a formação de imagens no espelho e na água. A causa da formação das imagens é resultante da “reflexão” dos raios visuais (luz visual) nesses corpos. No ponto de flexão dos raios, após estabelecerem o contato com o rosto, ver-se a formação de uma imagem “virtual” do rosto, sendo o mesmo efeito se o homem estivesse olhando a si mesmo de frente, como uma miragem do próprio rosto.

Além disso, Uddyotakara afirma que este processo ocorre de forma muito rápida, não sendo notado: “Embora a percepção do espelho e da face que surge um depois do outro, a sequência é tão rápida que o intervalo não é notado e a percepção do rosto é figurada na superfície do espelho.” (JHA, 1984, p. 1215, tradução nossa). Seja possível que Uddyotakara estivesse conjecturando sobre a velocidade dos raios visuais.

### 2.3 Do século VIII ao século XVI

Ainda na Índia, comentários do “*Vedanta Parivasa*”, livro da escola Vedanta (séculos VIII-XIII), discutiam sobre as ideias dos raios visuais. Esses raios, assim como os raios solares, deveriam ser considerados como corpos transparentes, o que conferia a eles um movimento rápido. No século X, é afirmado no livro “*Nyaya Kandali*”, um tratado da escola Vaisesika (cerca de X d.C.), que os raios visuais não possuem uma forma visível, nem podem ser tocados, e percorrem grandes distâncias antes que encontrem algum obstáculo que os façam parar. Se nada estiver no caminho, afastam-se do emissor e produzem o reconhecimento dos corpos (MALLIK, 1917, p. 3).

Já na China, durante os séculos VII a XIII, as dinastias Tang (618-906 d.C.) e Sung (960-1279 d.C.) unificaram a China e trouxeram estabilidade para a região. Essa estabilidade favoreceu o desenvolvimento da ciência e da tecnologia em um ritmo acelerado. Uma série de cientistas realizaram avanços na óptica durante este período.

**Shen Kuo (1031 a 1095 d.C.)** escreve e edita seu próprio livro “*Meng Xi Bi Tan*” (*Escrito em Meng Xi*), onde gravou suas observações de vida e sua compreensão da ciência e da tecnologia. Shen Kuo foi o primeiro a apresentar o conceito *geshu*, que incorpora o método matemático-físico e a lei física básica na óptica geométrica da imagem. O conceito incluiu imagens da câmera escura (pinhole), reflexão e refração. Além disso, descobriu uma relação entre as imagens produzidas pelo furo (pinhole) da câmera escura e as imagens de espelhos côncavos (GAN e TIAN, 2014, p. 2).

Também **Tan Qiao**, quem viveu no século 10 d.C. na Dinastia Tang do Sul, classificou de lentes quatro tipos: *gui* (plano-convexa), *zhu* (biconvexa), *di* (plano-concava) e *men* (côncava-convexa). E **He Huan** da Dinastia Song escreveu sobre as lentes compostas.

**Zhao Youqing (1230 a 1310 d.C.)**, na parte 5 – *Xiao Xia Guang Jin* {*O ponto de vista ótico do pinhole*} - de seu livro sobre astronomia “*Ge Xia Xin Shu*” {*Novo Livro para Inovação*}, detalhou a óptica da imagem de pinhole e a descreveu matematicamente. Também, analisou, com base na luz do sol e da lua, o efeito de tamanho do pinhole no resultado de imagem. Além disso, ele usou fontes de luz ajustáveis para estudar relações entre o fluxo de luz, a área de emissão de luz e irradiância (GAN e TIAN, 2014, p. 2-3).

Durante esse período das duas dinastias (Tang e Sung), o contato com o leste asiático se intensificou, estabelecendo-se as rotas de comércio entre a China e o Leste do continente. No entanto, a Europa havia entrado no período medieval (cerca de 600 ~ 1492 d.C.), o que reduziu

o desenvolvimento científico e tecnológico no continente e o contato com as tecnologias chinesas, sendo retomado no final do século XV.

Durante o século V, cristãos nestorianos, jacobitas e melkitas iniciaram um processo de imigração para o leste do continente asiático, na região do Irã, fugindo da perseguição instaurada na Europa. Além disso, Justiniano, em 529, decreta o fechamento das escolas atenienses, para acabar com a filosofia grega que era ainda disseminada na época. Os refugiados trouxeram consigo manuscritos de Aristóteles, Platão, Pitágoras, Plotino e outros; que foram, aos poucos, sendo traduzidos para o árabe. O estudo dessas obras e o financiamento dos califas gerou um produtivo desenvolvimento cultural e filosófico no oriente médio. Graças as versões árabes, boa parte das obras dos filósofos gregos puderam sobreviver ao período da idade média europeia, e ser reintroduzidas no continente. (PEREIRA, 2002).

Um dos primeiros filósofos árabes a escrever sobre óptica foi **Al-Kindi (801-873)**, que sustentou a ideia de que a visão ocorria por meio dos raios que emanavam dos olhos. Mais tarde, Roger Bacon cita o Al-Kindi, classificando-o como um dos melhores escritores sobre óptica. **Al-Haitam (965-1038)** escreveu o “*Tratado de óptica*” (*Kitab-u-al-Manazir*), rejeitava a ideia dos gregos de que a luz emanava do olho, para ele a fonte primária da luz seria uma força autoluminosa e a luz poderia ser emitida por outras forças secundárias, como no caso das partículas de poeira de um fecho de luz solar. Al-Haitham descreveu que as cores, presentes na luz, estavam misturadas a ela, não sendo visíveis sem ela e que seriam independentes dos objetos. Outro filósofo árabe que também contribuiu foi **Avicenna (980-1037)**, que estudou várias questões de Física tais como movimento, contato, força, vácuo, infinito, luz e calor. Ele observou que se a luz tivesse uma natureza particular, sua velocidade de propagação deveria ser infinita.

Apesar do desenvolvimento científico e tecnológico reduzido na Europa medieval, fortemente condicionada pelas doutrinas e dogmas da Igreja Católica, houve nesse período uma razoável atividade cultural orientada para a compreensão do mundo físico. Tentativas de aplicar a razão da filosofia grega para fundamentar o cristianismo foram feitas, e que aos poucos foi desenvolvendo o pensamento filosófico europeu.

**Robert Grosseteste (1168 - 1253)**, em sua obra “*De luce*” (*Sobre a luz*), retrata uma hipótese cosmogônica para tornar compreensível a gênese do universo. Em sua análise envolve o caráter da existência da luz, considerações matemáticas para explicar questões de ordem física (comparação ou transposição da matemática para física da época) e formulações hipotéticas sobre a origem do universo. Dentro deste contexto, pode-se destacar aspecto sobre a ideia de luz. Grosseteste inicia o tratado dizendo que “Julgo que a primeira forma corporal, que alguns

chamam de corporeidade, é a luz” (NASCIMENTO, 1974, p. 230), ou seja, a luz como sendo a extensão da matéria no espaço tridimensional. Ele desta que “De fato, por si a luz se difunde a si mesma por toda parte de tal modo que, se nada de opaco se opuser, de um ponto de luz gera-se instantaneamente uma esfera de luz qual for a grandeza desta última.” (NASCIMENTO, 1974, p. 230). Mais à frente Grosseteste reafirma: “Ora, propus que é a luz que tem como operação própria multiplicar-se a si mesma e difundir-se instantaneamente por toda parte.” (NASCIMENTO, 1974, p. 230).

Para Grosseteste o fato da luz de se propagar, implicaria que ela haveria formado o espaço tridimensional, pois em sua concepção o objeto que multiplicasse a si mesmo, se difundisse instantaneamente por toda parte e estendesse a matéria, seria capaz formar o espaço tridimensional.

Quanto a corporeidade, ele destaca que “[...] a luz não é uma forma conseqüente à corporeidade, mas é a própria corporeidade” (NASCIMENTO, 1974, p. 231); em outra passagem ele diz: “[...] a luz é a primeira forma corporal.”, concluindo que “Portanto, a luz, que é a primeira forma criada na matéria prima, multiplicando-se infinitamente a si mesma por si mesma de todos os lados e estendendo-se igualmente por toda parte [...]” e “[...] que em si é simples, infinitamente multiplicada, necessariamente estende a matéria, igualmente simples, nas dimensões de uma grandeza finita” (NASCIMENTO, 1974, p. 231).

Além disso, Grosseteste explica que “[...] é manifesto que a luz, pela sua multiplicação infinita, estende a matéria nas dimensões finitas menores e nas dimensões finitas maiores, relacionando-se entre si segundo quaisquer proporções racionais ou não” (NASCIMENTO, 1974, p. 232). Ou seja, ele relaciona as proporções matemáticas (diretamente e inversamente proporcionais) a com a propagação tridimensional da luz.

Quanto propagação tridimensional da luz, ele comenta que “[...] pela multiplicação infinita de si mesma, feita igualmente em todas as direções, estende a matéria igualmente por toda parte na forma de uma esfera” (NASCIMENTO, 1974, p. 233). Em outras palavras, Grosseteste argumenta que a propagação da luz ocorre de forma uniforme e radialmente em todas as três direções espaciais, sendo que o volume da esfera aumenta na medida que o luz se propaga.

**Roger Bacon (1214 - 1294)** também contribuiu para o avanço das ideias a respeito da luz. Em sua obra “*Opus Majus*”, dividida em sete partes, Bacon aborda na parte 5 questões de óptica inspiradas nas obras de Al-Kindi e Alhazen: princípios da visão - juntamente com fisiologia e funcionamentos dos olhos; análise das características das imagens observadas pelo olho humanos; reflexão da luz e lentes.

Algumas referências apresentadas nesta parte do trabalho são de difícil acesso, e, portanto, encontramos um grau de dificuldade para apresentar referências a determinados filósofos de certas épocas. Até aqui, as principais ideias sobre a luz e suas propriedades já tratavam da linearidade da luz. Sobre a visão, a maioria dos filósofos acreditavam que haveria um processo mediador entre olho e o objeto observado (que contempla as fontes luminosas). Também, compartilhavam da mesma ideia sobre reflexão: que os raios de luz eram desviados de volta para o observador, quando se observava corpos refletivos. E sobre a refração, esta propriedade se tornou evidente com Herão de Alexandria, desenvolvida pelos árabes e concluída na Europa durante o século XVII.

### 3 A CONCEPÇÃO MODERNA DA TEORIA DA LUZ

O século XVII foi marcado por um período de intensa atividade teórica e experimental, que deram base a formação da óptica que hoje conhecemos como óptica geométrica. Nesse período foram construídas as primeiras lunetas e microscópios, os quais, impulsionaram o desenvolvimento da associação de lentes e a criação de mais instrumentos ópticos. Johannes Kepler (1571-1630) cunhou os termos que atribuímos para formação dos tipos de imagem: real e virtual. A lei dos senos foi descoberta experimentalmente por Willebrord Snell van Royen (1580-1626), que morreu sem publicá-la, mas que foi divulgada por **René Descartes (1596-1650)**, como justificativa teórica em um de seus trabalhos.

Nesse período **Sir Isaac Newton (1643-1727)** inicia os estudos aos fenômenos da formação das cores no arco-íris; no surgimento das cores pelo prisma; por reações químicas, por películas finas de materiais e no aspecto colorido que aparecem nas bolhas de sabão. Além disso, novos fenômenos da luz foram descobertos: a difração da luz – descrita postumamente de **Francesco Maria Grimaldi (1618-1663)** em 1665, e a dupla refração da luz – descoberta por Erasmus Bartholin (1625-1698) em 1669 ao observar o cristal de calcita (cristal-da-Islândia).

Durante esse período, René Descartes foi o mais ilustre filósofo de seus contemporâneos, trabalhou com vários problemas de Física e Matemática, o que inclui o estudo para explicar a luz e os fenômenos associados a ela. Ele publica uma série de obras e tratados, das quais: *La Dioptrique*, *Les Geométrie* e *La Meteores*, são publicados como anexos do livro “*Discurs de la Methode*” em 1637. Apenas *La Dioptrique*, e *La Meteores* abordam aspectos da luz. Nelas ele apresenta a lei da refração com aspecto mecanicista, um estudo de vários tipos de lentes, uma abordagem sobre a visão e a explicação da formação do arco-íris (MARTINS e SILVA, 2015, p. 3).

Para Descartes o atomismo não era aceitável, não existindo a ideia de espaços vazios e nem de átomos. Mas pode-se observar aspecto do atomismo em sua explicação dos fenômenos observáveis, por meio de hipóteses sobre os movimentos invisíveis das partículas que formam a matéria.

Descartes classificava os tipos de matéria pelo tamanho e características próprias dos corpúsculos, resultando em três classes de elementos. O primeiro elemento constituiria os corpos luminosos, tais como: o fogo, o sol e as estrelas, cujas as partículas eram muitas pequenas e de grande movimentação. O segundo elemento estaria presente nos corpos transparentes e no espaço celeste, as quais, suas partículas, seriam redondas e de tamanho

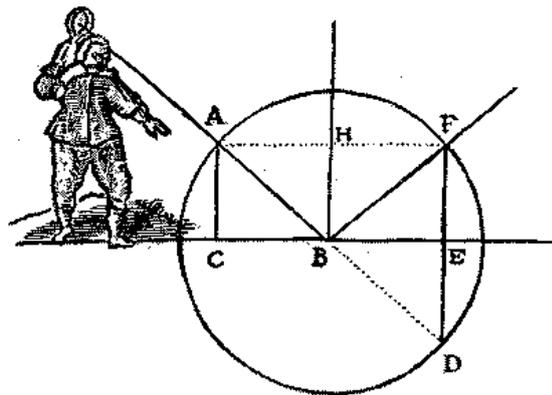
intermediário. E o terceiro elemento formaria os corpos opacos, sendo as suas partículas maiores, irregulares e com pouca movimentação.

Com base nisso, Descartes descreve que uma chama, composta pelas pequenas partículas primeiro elemento, agitariam rapidamente as partículas redondas do segundo elemento, no caso o ar, empurrando-as de tal forma, que o movimento se propagariam pelo segundo elemento (MARTINS e SILVA, 2015, p. 3). Assim, para Descartes, a luz seria uma propagação consecutiva de colisões nas partículas do segundo elemento, provocados pelos empurrões das partículas do primeiro elemento.

Descartes faz uma comparação da visão com um cego que usa uma bengala para tatear, mostrando que a luz não seria o transporte de matéria, mas um estímulo ao movimento, causado nas partículas do segundo elemento, igualmente a propagação da luz numa chama. E é por causa disto, que a luz tem a capacidade de atravessar, sem empecilho, os corpos densos e outros raios de luz, em sua teoria (MARTINS e SILVA, 2015, p. 3).

Para explicar a reflexão e a refração, Descartes faz uma analogia do fenômeno com a trajetória de uma bola de tênis lançada por uma raquete, que pela mecânica, as leis da reflexão e da refração da luz podiam ser comprovadas. Na ilustração da figura 3, observa-se que Descartes prova a lei reflexão simplesmente ao descrever a trajetória que a bola faz, ao sair do ponto A, mudar de direção em B e chegar em F. Geometricamente, o lado AC é idêntico ao lado FE, e prologando a trajetória de B a D formaria o triângulo BDE, que tem área igual ao triângulo ABC.

Figura 3 - Reflexão segundo Descartes



Fonte: TREMBLAY, 2002

Já na ilustração da figura 4, Descartes usa a água para demonstrar que trajetória da bola de A até B é alterada de B até I, quando a bola passa de um meio (ar) para outro (água). Isso mostra que, para Descartes, o desvio da trajetória da refração estava relacionado a densidade do meio transparente. Usando a geometria, ele consegue mostra a relação entre os lados AC e



Outro personagem importante da época é **Robert Hooke (1635-1703)**. Em 1665, Hooke publica sua obra “*Micrographia*”, que contém diversas descrições de materiais, animais e plantas observadas por um microscópio óptico, feito por ele, e desenhadas com extrema perfeição, o que causou um impacto nos estudos biológicos da época. Além desses aspectos, Hooke descreveu vários fenômenos ópticos, apresentando a sua interpretação para os mesmos.

Na descrição do fenômeno das cores em corpos transparentes e finos, Hooke relatou que, ao preparar as placas finas de mica, algumas placas de mica apresentavam uniformemente em sua superfície uma cor, mas quando duas placas eram sobrepostas surgiam cores novas e diferentes.

Além disso, Hooke descreveu que ao pressionar duas lentes convexas uma contra outra surgiam círculos coloridos, que podiam alterar radialmente se a força aplicada fosse alterada. Da mesma forma, acontece se à água ou algum líquido transparente fosse colocado entre as lentes, apareciam os círculos (MARTINS e SILVA, 2015, p. 12).

Ao estudar outros fenômenos de iridescência<sup>22</sup>, Hooke chegou à conclusão de que qualquer substância fina e transparente, posta entre duas superfícies com índices de refração diferentes, ou sobreposta em uma superfície refletora, produzia cores, não precisando de bordas escuras ou sombras para sua formação, pois a superfície da substância transparente estaria inteiramente iluminada. Isto eliminava a necessidade de luz e sombra na formação das cores.

Sobre a natureza da luz, ele conclui que a luz é produzida por movimentos rápidos das partículas dos corpos e que a própria luz seria um movimento vibratório que se espalha esfericamente da origem, semelhantemente as ondas que uma pedra gera ao ser jogada na água. Além disso, os raios de luz seriam as retas radialmente traçadas da fonte (centro) até a superfície de propagação.

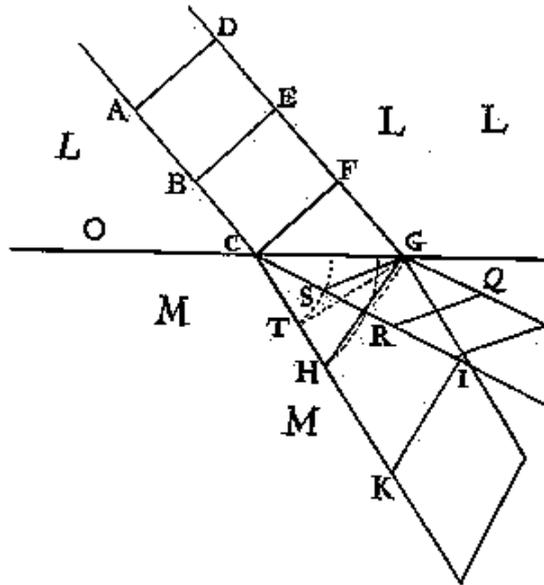
Para o processo de refração, Hooke explica que, em um meio homogêneo, a luz seria formada por vários pulsos orbitais (frentes de onda) perpendiculares a propagação dos raios (retas *AD*, *BE* e *CF*) (ver figura 5). Quando a luz incide de forma inclinada (em relação ao plano de incidência *O*) num meio com maior índice de refração, a frente de onda é desviada de sua trajetória de propagação, por causa da diferença de velocidade que a frente de onda apresenta nas duas regiões. Se o meio refrator tiver um índice de refração maior do que o meio incidente (do ar para a água), os raios se aproximam da normal (retas *GH*, *IK*). Mas se o meio refrator tiver o índice de refração menor do que o meio incidente (da água para o ar), os raios se

---

<sup>22</sup> Iridescência é um fenômeno óptico que faz certos tipos de superfícies refletirem as cores do arco-íris. Isto ocorre pela interferência dos raios de luz refletidos na superfície interna do material com os raios refletidos na superfície externa (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 10).

afastaram da normal (retas  $GS$ ,  $QR$ ). E em ambos casos, as frentes de onda propagariam nas direções dos raios refratados (MARTINS e SILVA, 2015, p. 13).

Figura 5 - Refração segundo Hooke

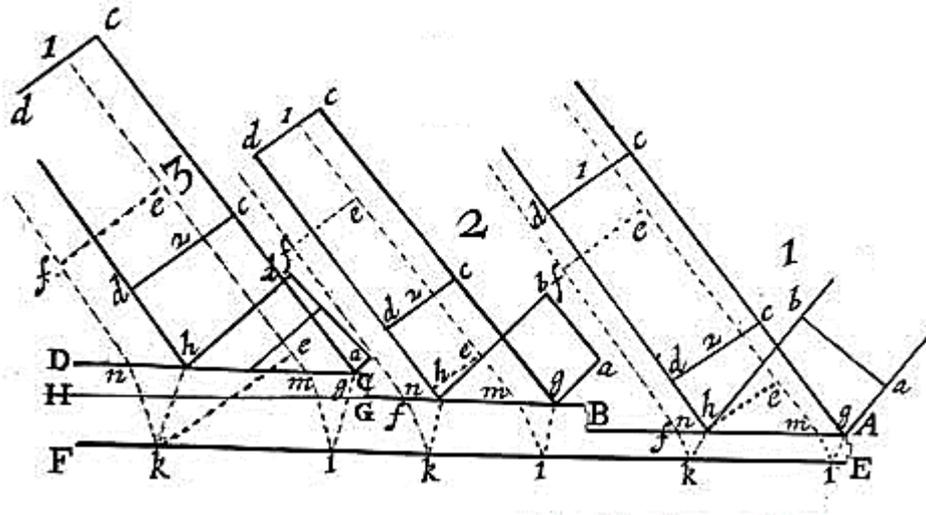


Fonte: HOOKE, 1989, p. 253.

Sobre a formação das cores, ele atribuiu uma propriedade que é imposta pelo meio refrator aos raios refratados, de que estes teriam duas partes, sendo uma propagada para frente e de intensidade mais fraca, e a outra propagada na mesma trajetória que tinha antes de ser refratada e de intensidade mais forte (ver figura 6). Para parte menos intensa surgia o azul ( $PPP$ ), para a parte mais intensa surgia o vermelho ( $QQQ$ ), e as demais cores se formariam na intersecção dessas duas partes ( $NS$ ). Dessa forma, as cores na teoria de Hooke relaciona a presença dos pulsos com proporções entre fortes e fracas e a inclinação da frente de onda. E por isso, sempre que houvesse refração, haveria o surgimento das cores. Tais efeitos podem ser observados nos experimentos com prismas.



Figura 7 - Formação das cores em diferentes camadas de mica



Fonte: HOOKE, 1989, p. 253.

### 3.1 Newton e Huygens

Em 1672, Newton publica “*Nova teoria sobre luz e cores*”, o qual foi o seu primeiro artigo, onde descreve a sua concepção sobre a natureza da luz branca e a formação das cores, com base em observações experimentais feitas por ele. Para escrever este trabalho, Newton recorreu às suas anotações e observações sobre as cores feitas entre os anos de 1663 a 1667, que serão apresentadas em alguns momentos da discussão.

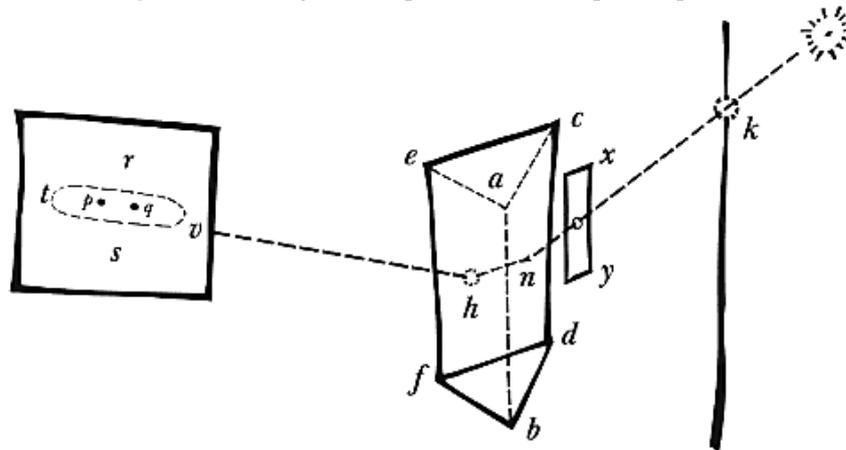
Inicialmente Newton descreveu a dispersão cromática, mostrando aspectos da formação do espectro. Ele esperava que a formação resultante do feixe emergente do prisma fosse circular, pois se todos os raios tivessem o mesmo processo de refração no prisma a imagem formada seria semelhante à forma circular do disco solar. Mas não foi o que Newton observou:

[...] depois de um tempo dedicando-me a considerá-las [dispersão cromática] mais seriamente fiquei surpreso por vê-las em uma forma oblonga que, de acordo com as leis aceitas da Refração, esperava que deveria ter sido circular.

Elas terminavam dos lados em linhas retas, mas nas extremidades o enfraquecimento da luz era tão gradual que era difícil determinar corretamente qual era a sua forma; no entanto pareciam semicirculares. (SILVA e MARTINS, 1996, p. 315).

e em suas anotações de experiências realizadas por volta de 1666, ele descreveu o seguinte:

**Figura 8** - Ilustração da dispersão cromática por um prisma



Fonte: NEWTON, 2003, p. 2.

Tomei um prisma, cujo ângulo FBD era cerca de  $60^\circ$ , em um quarto escuro, no qual [a luz] do Sol adentrava apenas por um pequeno furo *k* (Figura [8]), e o coloquei próximo ao orifício *k* de tal maneira que os raios eram igualmente refratados nos pontos *n* e *h* ao entrar e sair do prisma, sendo então projetadas as cores *rstv* na parede oposta. Todos os raios que produziam as cores estavam ao longo de um arco circular, igualmente refratados. Entretanto, sua forma era oblonga, terminada em seus lados *r* e *s* com linhas retas, sendo sua largura de 2 polegadas, seu comprimento de cerca de sete ou oito polegadas, e os centros do vermelho e azul (respectivamente, *q* e *p*) distando cerca de 2 a 3 polegadas entre si [(figura 8)]. A distância desde a parede *trsv* até o prisma era de 260 polegadas (RIBEIRO, 2017, p. 4).

Considerando o experimento de dispersão cromática acima, Newton analisa o fenômeno em vários aspectos, os quais, para ele, poderiam contribuir para a forma irregular da dispersão cromática observado na projeção. Ele destaca que poderia ser as irregularidades do prisma (bolhas de ar deixas durante a fabricação, imperfeição das superfícies ou outro tipo de irregularidade):

Então suspeitei se por alguma irregularidade no vidro ou outra irregularidade contingente [...]. E para testar isso, tomei outro Prisma semelhante ao primeiro e coloquei-o de tal modo que a luz passando por ambos pudesse ser refratada de maneiras contrárias [...]. Aconteceu que a luz que era difundida pelo primeiro Prisma em uma forma oblonga, foi reduzida pelo segundo a uma [forma] arredondada com tanta regularidade como quando não passava por eles. Assim, fosse qual fosse a causa daquele comprimento, não era qualquer irregularidade contingente (SILVA e MARTINS, 1996, p. 315-316).

Newton concluiu que não seriam as irregularidades das superfícies do prisma, pois os ângulos dos raios de incidência e emergência das refrações em ambos os lados eram quase iguais. Nessa experimentação, Newton calculou o índice de refração do vidro que foi de 1,55 (SILVA e MARTINS, 1996, nota 19).

Outro aspecto que ele explorou, foi a possível trajetória curva da luz causado pelo movimento de rotação dos raios de luz ao passarem pelo prisma:

Então comecei a suspeitar se os Raios, após sua passagem através do Prisma, não se moveriam em linhas curvas e de acordo com sua maior ou menor curvatura tendessem para diversas partes da parede. E minhas suspeitas aumentaram quando lembrei que frequentemente vi uma bola de Tênis, golpeada com uma Raquete oblíqua, descrever tal linha curva. Pois sendo comunicado tanto um movimento circular como um progressivo a ela pelo golpe [...]. E pela mesma razão, se os Raios de luz fossem possivelmente corpos globulares e por sua passagem oblíqua de um meio a outro adquirissem um movimento circular, eles deveriam sentir a resistência maior do Éter ambiente naquele lado onde os movimentos se unem e por isso serem continuamente encurvados para o outro (SILVA e MARTINS, 1996, p. 317-318, grifo nosso).

Apesar da possível conjectura, Newton não pôde observar ocorrência do encurvamento dos raios de luz, após a emergência da superfície do prisma. Além disso “a diferença entre o comprimento da imagem e o diâmetro do buraco através do qual a luz era transmitida era proporcional à sua distância” (SILVA e MARTINS, 1996, p. 318), pois se houvesse o encurvamento, o feixe emergente não seria cônico, e a proporcionalidade tamanho da mancha e distância do orifício não seriam válidas.

Ainda no mesmo trabalho, Newton descreveu o *experimentum crucis* (experimento crucial/decisivo), um experimento com prismas mais elaborado que seus experimentos anteriores, que foi estruturado da seguinte forma: um raio de luz proveniente do Sol era decomposto pelo primeiro prisma e projetada na primeira prancha, usada como anteparo. Nessa prancha havia um furo no qual era usado para selecionar uma pequena faixa do espectro visível. Atrás da prancha, mas em cima do furo, haveria um segundo prisma que refratava a luz proveniente do furo, projetando os raios de luz na segunda prancha. Esse segundo prisma não separaria a luz em novas cores, apenas produziria uma mancha da cor selecionada. Com base nisso, Newton conclui

E vi pela variação daqueles lugares [na parede] que a luz, tendendo para aquela extremidade da Imagem em direção à qual a refração do primeiro Prisma foi feita, sofreu no segundo Prisma uma Refração consideravelmente maior que a luz tendendo para a outra extremidade. E assim a verdadeira causa do comprimento da Imagem foi detectada não ser outra, senão que a Luz consiste em Raios diferentemente refrangíveis<sup>23</sup> que, sem qualquer diferença em suas incidências, foram, de acordo com seus graus de refrangibilidade, transmitidos em direção a diversas partes da parede. (SILVA e MARTINS, 1996, p. 318, grifo nosso).

Observa-se que essas foram as primeiras conclusões obtidas por Newton sobre a dispersão cromática (infelizmente Newton não elabora uma associação entre cor e refrangibilidade). Mais à frente ele enfatiza que “a Luz é ela própria uma Mistura heterogênea de Raios diferentemente refrangíveis” (SILVA e MARTINS, 1996, p. 319), ou seja, que a luz

<sup>23</sup> “Newton utiliza a palavra ‘refrangibilidade’ para indicar uma propriedade dos raios luminosos: os raios mais refrangíveis são os que são mais desviados na refração. Por outro lado, o termo ‘refringência’ se refere a uma propriedade das substâncias transparentes: uma substância mais refringente é a que produz um maior desvio da luz.” (SILVA e MARTINS, 1996, p. 318, nota 30).

é compostas de vários raios de luz com cores diferentes. Mais a diante Newton complementa esse novo conceito:

[...] informei-lhe que a Luz não é similar ou homogênea, mas consiste de raios diformes, alguns dos quais são mais refrangíveis que outros; de tal modo que, daqueles que incidem de modo semelhante no mesmo meio, alguns serão mais refratados que outros, e não por qualquer virtude do vidro ou outra causa externa, mas por uma pré-disposição que cada raio particular tem de sofrer um grau particular de refração. (SILVA e MARTINS, 1996, p. 320).

Após isto, Newton escreve 13 proposições, da quais pode-se destacar as mais importantes para esse trabalho.

Na proposição 1, Newton destaca que, do mesmo modo que a luz branca apresenta vários raios em graus diferentes de refração, os raios de luz diferem na exibição uma cor em particular, não sendo qualidades da luz, mas propriedades próprias de cada raio. Dessa forma Newton conclui que os graus de refração estão diretamente relacionados para cada cor, ou seja, os raios menos refratados apresentam cores para vermelho; os mais refratados apresentam a cor violeta e as refrações intermediárias para as demais cores do espectro visível, como ele ressalta na proposição 2. Além disso, na proposição 3, ele evidencia que não há formação de novas cores, a partir de uma cor específica, não sendo observado experimentalmente por ele, tal fato.

Para Newton existiam sete cores destacáveis do espectro eletromagnético, como apresentou na proposição 5: “Há, portanto, dois tipos de Cores: um original e simples, o outro composto dessas. As cores Originais ou primárias são Vermelho, Amarelo, Verde, Azul e um Púrpura-violeta, junto com Laranja, Índigo e uma variedade indefinida de gradações Intermediárias.” (SILVA e MARTINS, 1996, p. 322).

Sobre a luz branca, ele fez as seguintes observações, nas proposições 7 e 8:

7. Mas a composição mais surpreendente e maravilhosa foi aquela da Brancura. Não há nenhum tipo de Raio que sozinho possa exibi-la. Ela é sempre composta, e para sua composição são necessárias todas as Cores primárias citadas anteriormente misturadas numa proporção devida. [...] convergir todas as Cores do Prisma e sendo desse modo novamente misturadas como estavam na luz antes de sua Incidência sobre o Prisma, reproduziram luz inteiramente e perfeitamente branca e não diferindo sensivelmente da Luz direta do Sol [...].

8. [...] Brancura é a cor usual da Luz, pois a Luz é um agregado confuso de Raios dotados de todos os tipos de Cores [...]. E de tal agregado confuso, como disse, é gerada Brancura, se houver uma devida proporção de Ingredientes, mas se algum predominar a Luz deve tender para aquela cor, como acontece na chama Azul do Enxofre, na chama amarela de uma Vela e nas várias cores das estrelas Fixas. (SILVA e MARTINS, 1996, p. 322).

Quanto as cores que os corpos apresentam, Newton explicou que



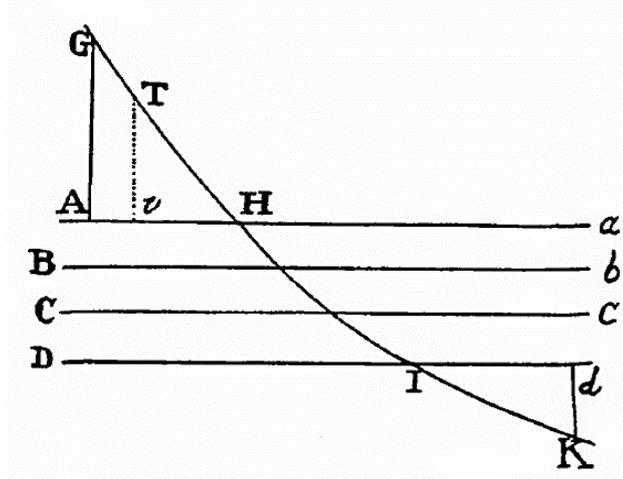
Fonte: NEWTON, 2016, p. 290.

Sejam Aa e Bb dois planos paralelos e faça o corpo incidir sobre o primeiro plano Aa na direção da linha GH, e durante toda sua passagem através do espaço intermediário faça-o ser atraído ou impelido em direção ao meio de incidência, e, por aquela ação, faça-o descrever uma linha curva [...], emergindo na direção da linha IK. Trace IM perpendicularmente a Bb, o plano de emergência, encontrando em M a linha de incidência GH prolongada, e em R o plano de incidência Aa; e estenda a linha de emergência KI até encontrar HM em L. Em torno do centro L, com o raio, LI, descreva um círculo cortando tanto HM em P e Q, [...]; e, primeiro, se a atração ou impulso forem supostos uniformes, a curva HI [...] será uma parábola [...] e, além disso, a linha HM será bissecionada em L. Assim, se em direção a MI for traçada a perpendicular LO, então MO [e] OR serão iguais; [...] [da mesma forma] as linhas [...] ON [e] OI, e [...] [as linhas] totais MN [e] IR também serão iguais. [...]. Portanto, a razão do seno do ângulo de incidência LMR para o seno do ângulo de emergência LIR é dada. Q.E.D. (NEWTON, 2016, p. 289-290).

Na passagem acima, ele demonstra que o seno do ângulo de incidência da partícula no plano Aa é igual ao seno do ângulo de emergência do plano Bb, assumindo que exista uma força constante que interage com a partícula. Depois Newton generaliza essa situação para um segundo caso, mostrando que o fato do primeiro caso, é válido também se a força for variável.

No teorema seguinte, Newton faz a mesma análise a para a velocidade da partícula dizendo que “o mesmo sendo suposto, afirmo que a velocidade do corpo antes de sua incidência está para a sua velocidade após a emergência com o seno de incidência para o seno de emergência.” (*Proposição XCV, Teorema XLIX*) (NEWTON, 2016, p. 291). Para comprovar isto, Newton faz a seguinte prova descrita na figura 10:

**Figura 10** - Comprovação geométrica entre os senos de incidência e emergência



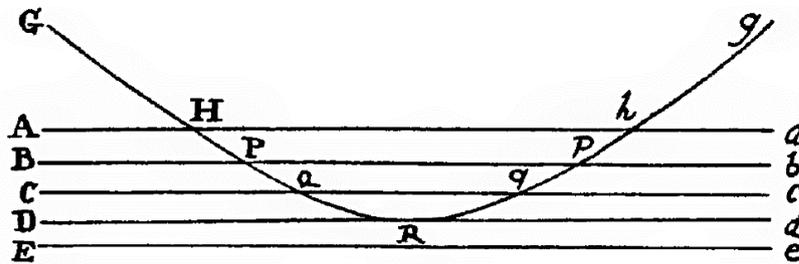
Fonte: NEWTON, 2016, p. 291.

Faça AH e Id iguais, e levante as perpendiculares AG, dK encontrando as linhas de incidência e emergência GH, IK em G e K. Em GH, tome TH igual a IK, e em direção ao plano Aa faça incidir a perpendicular Tv. E [...] faça o movimento do corpo ser decomposto em dois, um perpendicular aos planos Aa, Bb, Cc etc., e outro paralelo a eles. A força de atração ou impulso, agindo em direções perpendiculares àqueles planos, não altera de forma alguma o movimento em direções paralelas; e o corpo,

portanto, prosseguindo com este movimento, passará em tempos iguais através daqueles intervalos paralelos iguais [...]; isto é, ele descreverá as linhas GH, IK em tempos iguais. Portanto, a velocidade antes da incidência está para a velocidade após a emergência como GH para IK ou TH, isto é, como AH ou Id para vH, isto é (considerando TH, ou IK, como raio), como o seno de emergência para o seno de incidência [(figura 9)]. Q.E.D. (NEWTON, 2016, p. 291-292).

Na última proposição da seção Newton descreve que “o mesmo sendo suposto, e sendo mais rápido o movimento antes da incidência do que após, afirmo que, se a linha de incidência for inclinada continuamente, o corpo finalmente será refletido, e o ângulo de reflexão será igual ao ângulo de incidência” (*Proposição XCVI, Teorema I*) (NEWTON, 2016, p. 292). Assim ele demonstra:

Figura 11 - Igualdade entre os senos de incidência e emergência para a reflexão total



Fonte: NEWTON, 2016, p. 292.

Imagine o corpo passando entre os planos paralelos Aa, Bb, Cc etc. [(figura 11)]; descrevendo arcos parabólicos como acima; e faça esses arcos serem HP, PQ, OR etc. E faça a inclinação da linha de incidência GH para o primeiro plano Aa ser tal que o seno de incidência esteja para o raio do círculo do qual ele é seno, na mesma razão que o mesmo seno de incidência tem para com o seno de emergência do plano Dd no espaço Dd-eE; e quando o seno de emergência estiver tornando-se igual ao raio, o ângulo de emergência será um ângulo reto, e, portanto, a linha de emergência coincidirá com o plano Dd. Faça o corpo chegar a este plano no ponto R; e como a linha de emergência coincide com aquele plano, é evidente que o corpo não pode prosseguir em direção ao plano Ee. Mas também não pode prosseguir na linha de emergência Rd; pois é sempre atraído ou impelido em direção ao meio de incidência. Retornará, portanto, entre os planos Cc, Dd, descrevendo um arco de parábola QRq, cujo vértice principal [...] está em R, e corta o plano Cc em q, com o mesmo ângulo que antes em Q; então, prosseguindo nos arcos parabólicos qp, ph etc. [...] cortará o resto dos planos com os mesmos ângulos em p, h etc., como fez antes em P, H etc.; e emergirá, no final, com a mesma inclinação em h com a qual incidiu primeiro naquele plano em H. Imagine agora que os intervalos dos planos Aa, Bb, Cc, Dd, Ee etc., são infinitamente diminuídos, e que seu número é infinitamente aumentado, tal que a ação da atração ou impulso, exercida de acordo com qualquer lei dada, possa tornar-se contínua; e o ângulo de emergência, permanecendo sempre igual ao ângulo de incidência, será também, no final, igual a este. Q.E.D. (NEWTON, 2016, p. 292-293).

Observando esses três pontos Newton descreve no escólio que as descrições se parecem muito com os fenômenos de reflexão e refração da luz, descoberta por Snell e mostrada por Descartes. Além disso, não via nada de errado ao aplicar as tais proposições a óptica, mesmo sem considerar a natureza dos raios de luz ou se são corpos de fato, apenas levando em conta as curvas dos corpos, que apresentavam semelhanças com as curvas dos raios de luz.

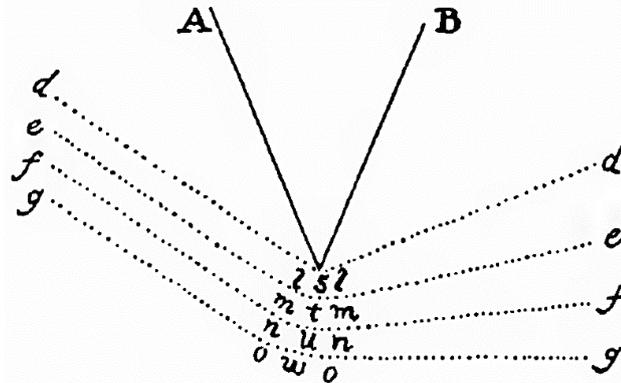
Aproveitando-se da discussão, Newton comentou que a luz se propagava em sucessão e que isto poderia ser confirmado pelas as observações de astrônomos dos eclipses das luas de Júpiter. Newton complementa dizendo que a luz demora de 7 a 8 minutos para viajar do Sol até a Terra, evidenciando que a velocidade da sucessão (pulsos de) da luz seria finita e muito rápida.

Além disso, Newton discute a difração da luz dizendo que:

[...] os raios de luz que estão em nosso ar (como foi mais tarde descoberto por Grimaldi, admitindo luz em um quarto escuro através de um pequeno orifício, experiência que eu também tentei), em sua passagem próximo às angulosidades dos corpos, sejam eles transparentes ou opacos (tais como as bordas circulares ou retangulares de moedas de ouro, prata e bronze, ou de facas, ou de pedaços quebrados de pedra ou vidro), são dobrados ou defletidos em torno daqueles corpos como se fossem atraídos para eles; e aqueles raios que, em sua passagem, aproximam-se o máximo dos corpos são os mais defletidos, como se fossem os mais atraídos; fato este que eu mesmo cuidadosamente observei. E aqueles que passam a grandes distâncias são menos desviados, e aqueles em distâncias ainda maiores são um pouco defletidos na direção contrária, e formam três franjas de cores (NEWTON, 2016, p. 293-294).

Vemos que o fenômeno da difração da luz, para Newton, indicava a existência de tal força, que agiria na luz, causando uma deflexão da sua trajetória. Isto mostra, na visão de Newton, uma possível interpretação mecânico-corpusculista para fenômeno da difração. Ele segue a discussão exemplificando o seguinte:

**Figura 12** - Esquema da difração da luz na parte de corte da faca

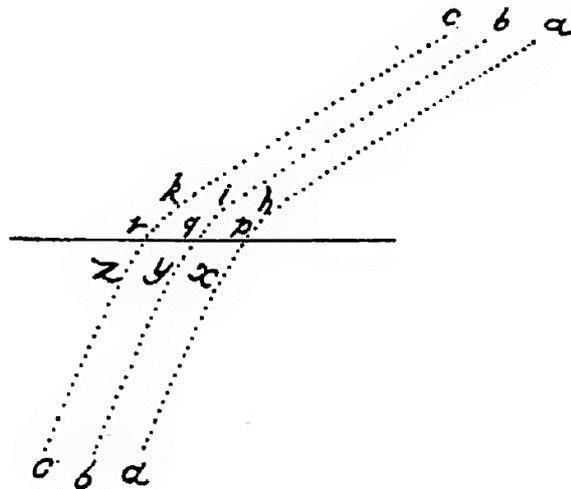


Fonte: NEWTON, 2016, p. 293.

A figura [12] representa a borda de uma faca, ou qualquer tipo de cunha  $AsB$ ; e  $gowog$ ,  $fnunf$ ,  $emtme$ ,  $dlsld$  são raios defletidos em direção à faca nos arcos  $owo$ ,  $nvn$ ,  $mtm$ ,  $Isl$ ; cuja deflexão é maior ou menor de acordo com sua distância da faca. Agora, uma vez que a deflexão contínua dos raios dá-se no ar fora da faca, segue que os raios que incidem sobre a faca são primeiro defletidos no ar, antes de tocarem a faca. (NEWTON, 2016, p. 294).

e continuando nesse raciocínio Newton complementa:

**Figura 13** - Reflexão no vidro segundo Newton



Fonte: NEWTON, 2016, p. 294.

E o caso é o mesmo com os raios que incidem no vidro. A refração, portanto, não se dá no ponto de incidência, mas gradualmente, por uma deflexão contínua dos raios [(figura 13)]; o que é feito em parte no ar, antes de tocarem o vidro, e em parte (se não estou enganado) dentro do vidro, após terem nele penetrado; como está representado nos raios *ckzc*, *biyb*, *ahxa*, incidindo em *r*, *q*, *p*, e defletidos entre *k* e *z*, *i* e *y*, *h* e *x* (NEWTON, 2016, p. 294).

Em 1702, Newton publica “*Optica*”, cujo objetivo era de explicar as propriedades da luz propondo hipóteses e provando-as pelo raciocínio lógico e por experiências. O livro está dividido em três partes.

A primeira parte (Livro I) expõem a decomposição da luz branca no espectro cromático ao passar por um prisma. A segunda parte (Livro II) discorre sobre a formação das cores (“anéis de Newton”) por reflexão e refração em corpos transparentes finos e espessos, as quais são baseadas nas propriedades dos corpúsculos de luz e suas interações com meio. Esta parte está subdividida em quatro seções. A seção 1 trata de várias observações. Um fato que podemos destacar dessa seção é a de que Newton deduziu a espessura entre superfícies, necessária para formação dos anéis coloridos, apenas comparando a largura dos anéis, a distância da superfície refratora e as inclinações dos raios. Já a seção 2 é formada por comentários das observações da seção 1. A seção 3 apresenta proposições referente aos fenômenos das lâminas transparentes que está relacionado com os outros corpos. Newton afirma que “a reflexão não é causada pelo choque direto da luz com as partes sólidas ou impenetráveis dos corpos” (SILVA, 2009, p. 5). Além disso, ambas, reflexão e refração, seriam a mesma força, mas variando segundo as circunstâncias. Newton considera a existência de dois estados de transição dos raios de luz, que são fácil reflexão e fácil transmissão.

O estado de fácil reflexão ocorre quando os raios são refletidos pelas as superfícies dos corpos transparentes e o estado de fácil transmissão ocorre quando os raios são refratados. Este

processo é causado quando “os raios de luz, ao se chocarem com a superfície de um corpo, induzem vibrações que se propagam nesse meio com uma velocidade superior ao do próprio raio (luz) e com as quais as partículas de luz interagem.” (SILVA, 2009, p. 5). Com isso, Newton entende que as espessuras dos anéis coloridos são intervalos intercalados de fácil reflexão e fácil transmissão, que o permitiu determinar uma periodicidade para os raios (o que se aproxima da ideia do comprimento de onda), não se referido a nenhuma ideia de comprimento de onda, visto que não via a luz como um onda. E a seção 4 aborda outras observações realizadas por Newton.

Por fim, a terceira e última parte (Livro III) da obra aborda as difrações (inflexões). Esta parte trata de uma seção incompleta para Newton, pois ele não havia terminado os seus estudos nessa área, deixando apenas “questões de pesquisa”, que poderia investigadas futuramente (SILVA, 2009, p. 5).

As questões estão divididas tematicamente da seguinte forma: “1-6, Reflexão, refração, inflexão; 5-11, calor e fogo; 12-17, a visão humana; 18-22, o éter; 23-24, vibrações do éter; 25-27, outras propriedades da luz; 28-31, a luz não é movimento ou pressão, mas corpúsculo” (SILVA, 2009, p. 6).

Com respeito à visão Humana, Newton questionou se os raios de luz poderiam causar vibrações na túnica retina e se elas que geravam o sentido da visão. Para ele, tal fato era possível considerando-se que a fibras nervosas conduzissem as vibrações mecânicas resultantes dos choques dos corpúsculos de luz na túnica retina. Além disso, ele indaga a relação entre a percepção das cores e a excitação dos tipos dos raios, como também a harmonia e a discordância das cores causam no nervo óptico. Na visão de Newton, a percepção da luz no olho apresentaria uma semelhança com a percepção do som no ouvido, pelas considerações que ele faz referente a pressão dos dedos que fazemos nos olhos e os choques dos corpúsculo (SILVA, 2009, p. 6).

Já a transmissão de calor no vácuo, Newton considera a existência do meio mais sutil o que o ar, ou seja, a existência do éter, por onde as vibrações do calor se propagariam. Esse meio sutil (éter) teria a propriedade de penetrar em todos os corpos; e se houver luz, ela teria de atravessar e interagir com esse meio sutil.

E sobre a natureza da luz, Newton nega a existência da natureza ondulatória da luz, justificando-se pelos fatos de não haver um encurvamento da luz quando passa por obstáculos; de não propagar em linha reta e em todas as distâncias, o que necessitaria de uma força infinita para tal ato.

Outro fato que Newton destaca é a não existência do fluido denso, que faz os planetas terem um movimento regular e duradouro. Ele justifica que não se perceber qualquer resistência

e a existência de matéria perceptível. Assim, a luz não poderia ser uma pressão ou movimento vindo dos corpos celestes. Então, Newton propõem que os raios de luz são corpos minúsculos que são emitidos pelas substâncias brilhosas, pois se é uma espécie de matéria, então, a deveria combina-se com os outros tipos de espécies (SILVA, 2009, p. 7).

Em 1690, **Christiaan Huygens (1629-1695)** publica “*Tratado sobre a Luz*”, um trabalho que propõe explicar a reflexão e refração segundo um modelo ondulatório. Huygens apresenta nesse artigo uma teoria alternativa, com o ponto de vista voltado para um modelo mecânico-ondulatório para a luz, contrastando o modelo mecânico-corpúscular desenvolvido por Newton.

Nesse artigo, Huygens justificava que as demonstrações da óptica são fundamentadas sobre verdades tiradas da experiência (propagação retilínea da luz, a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão e o desvio do raio refratado - a regra dos senos.), pois em sua época, aqueles que escreviam sobre as diferentes partes da óptica, propunham hipóteses engenhosas ou explicações insatisfatórias quanto ao assunto. O seu objetivo era dar razões mais claras e plausíveis para essas verdades (fenômenos ópticos); uma contribuição mais clara para o entendimento de tais fenômenos (KRAPAS, QUEIROZ e UZÊDA, 2011, p. 125), como ele evidenciou

Não se encontra pessoa nenhuma que tenha ainda explicado de forma provável esses fenômenos primeiros e mais notáveis da luz, a saber: porque ela se propaga seguindo em linhas retas e como os raios visuais, provindo de uma infinidade de lugares, cruzam-se sem em nada atrapalharem-se uns aos outros. (HUYGENS, 1986, p. 11).

Huygens descreveu que a luz é produzida pelo fogo e pela chama, os quais poderiam dissolver e fundir outros corpos, por constituírem de corpos elementares em movimento muito rápido. E que quando concentrada por espelhos côncavos pode separar as partes dos objetos, por de “queimar” com como fogo. Referente a visão, ele considera que a sensação de ver é excitada pela impressão das imagens (eidolas) que age nos nervos do fundo dos olhos. Ele discorre ambos os casos para justificar “que a luz consiste em um movimento da matéria que se encontra entre nós e os corpos luminosos” (HUYGENS, 1986, p. 12).

Sobre a extrema velocidade da luz em espalhar-se em todas as direções e os raios luminosos atravessando uns aos outros sem se atrapalharem, Huygens diz que tais fenômenos não poderiam ser resultado do transporte de uma matéria, mas sim como ocorre na propagação som no ar:

Sabemos que, por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em toda a volta do lugar onde foi produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte do ar a outra. A propagação desse movimento se faz

com igual velocidade para todos os lados e devem se formar como superfícies esféricas que crescem sempre e que chegam a atingir nossas orelhas. Ora, não há dúvida de que a luz também não venha do corpo luminoso até nós por algum movimento impresso à matéria que está entre os dois – pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passe de um até o outro. Se a luz gasta tempo para essa passagem [...] seguir-se-á que esse movimento impresso à matéria é sucessivo e que, conseqüentemente, ele se espalha [...] por ondas esféricas. (HUYGENS, 1986, p. 12).

Nesse ponto, Huygens começa a construir a ideia da velocidade da luz, e conseqüentemente, o surgimento do conceito de ondas, caracterizando o aspecto ondulatório da teoria de Huygens, como ele mesmo declara: “Eu as chamo ‘ondas’ por semelhança àquelas que vemos formarem-se na água quando aí se joga uma pedra e que representam uma propagação sucessiva circular.” (HUYGENS, 1986, p. 12).

Mais à frente, ele salienta que o tempo de eclipsagem de objeto celeste, seria um fator importante para quantificar tal velocidade:

É verdade que isso leva a supor uma estranha velocidade, que seria cem mil vezes maior do que a do som. [...] pois não se trata do transporte de um corpo com tal velocidade, mas de um movimento sucessivo que passa de uns aos outros. [...] não senti dificuldade em supor que a emanção da luz se fazia no tempo, vendo que assim todos os fenômenos podiam ser explicados [...]. Mas aquilo que emprego apenas como uma hipótese recebeu há pouco tempo uma aparência de verdade estabelecida, pela engenhosa demonstração do Sr. Roemer que [...] se baseia [...] em observações celestes, e prova não apenas que a luz gasta tempo para sua passagem, mas também mostra quanto tempo ela emprega, e que a velocidade é pelo menos seis vezes maior do que a que acabei de dizer. Para isso ele se serve dos eclipses sofridos pelos pequenos planetas que giram em torno de Júpiter [...]. (HUYGENS, 1986, p. 14-15, grifo nosso).

Apesar da semelhança entre som e a luz, Huygens destaca três aspectos que os diferenciam. A primeira diferença se apresenta na produção do movimento que os causa:

Sabe-se que a produção do som é feita pelo súbito abalo de um corpo [...] que agita todo o ar contíguo. Mas o movimento da luz deve nascer como de cada ponto do objeto luminoso [...]. Creio que a melhor explicação para esse movimento é a suposição de que os corpos *luminosos líquidos* {chama, sol e as estrelas} são compostos por partículas que nadam em uma matéria muito mais sutil, que as agita com uma rapidez, e as e as faz chocarem-se contra as partículas do éter, que as cercam, e que são muito menores do que elas. Nos *sólidos luminosos* {carvão, ou metal incandescente} [deve-se supor] que esse mesmo movimento é causado pela agitação violenta das partículas do metal ou da madeira, das quais as que estão na superfície também batem na matéria etérea. Além disso, a agitação das partículas que geram a luz deve ser muito mais rápida e brusca do que a que causa o som dos corpos, pois não vemos que o tremor de um corpo que soa seja capaz de fazer nascer a luz, assim como o movimento da mão no ar não é capaz de produzir som. (HUYGENS, 1986, p. 16-17, grifo nosso).

A segunda diferença está no tipo de matéria em que os movimentos se propagam: “[...] essa matéria em que se propaga o movimento que vem dos corpos luminosos, e que chamo *etérea*, ver-se-á que não é a mesma que serve para a propagação do som. [...] pois [...] esta é o

próprio ar que sentimos e que respiramos [...]” (HUYGENS, 1986, p. 17). Para justificar isto Huygens descreve:

[...] e quando ele é retirado de um lugar, a outra matéria que serve à [propagação] da luz não deixa de ser encontrada aí. Isso é provado encerrando um corpo sonoro em um recipiente de vidro, [...] após haver evacuado todo o ar, não se ouve nenhum som do metal quando atingido. [...], mas também que não é esse mesmo ar, mas uma outra matéria, na qual se propaga a luz; [...] tendo sido retirado o ar desse recipiente, a luz não deixa de atravessá-lo como antes. (HUYGENS, 1986, p. 17).

E a terceira diferença surge-se na forma como a luz e o som se propagam:

[...] quando se considera que o ar é de natureza tal que pode ser comprimido e reduzido a um espaço muito menor do que ocupa ordinariamente; [...] à medida que é comprimido, esforça-se por aumentar. [...]. Mas a extrema velocidade da luz, e outras propriedades que ela possui, não poderiam permitir uma tal propagação de movimento, e mostrarei aqui de que maneira concebo que ela deva ser feita. (HUYGENS, 1986, p. 18, grifo nosso).

Huygens entendeu que sua assimilação da luz com a propagação do som no ar, teria problemas ao lidar com a extrema velocidade da luz. Para contornar a situação, ele associou a propagação do movimento com um modelo mecânico, parecido com berço de Newton<sup>26</sup>, que demonstra a propriedade dos corpos duros transmitirem movimento uns aos outros, ou seja, a propagação uma onda mecânica longitudinal em meio sólido, a qual ele atribuiu ao éter, mas que se torna mais esclarecido nessa parte do seu trabalho. Ele complementou dizendo que

Aí se vê uma passagem de um movimento com uma velocidade muito grande, e que se torna ainda maior quando a matéria das bolas é ainda mais dura. Mas note-se que [...] não é instantâneo, mas sucessivo, e que assim ele necessita tempo. Pois se o movimento [...] não passasse sucessivamente por todas essas bolas, [...] todas elas avançariam juntas - o que não ocorre. (HUYGENS, 1986, p. 18).

e usou tal fato para dizer que

Ora, para aplicar esse tipo de movimento àquilo que produz a luz, nada impede que imaginemos que as partículas do éter sejam de uma matéria tão próxima da dureza perfeita e de uma recuperação tão rápida quanto quisermos. (HUYGENS, 1986, p. 18).

[...] essas partículas de éter, apesar de seu pequeno tamanho, são ainda compostas de outras partes, e sua elasticidade consiste no movimento muito rápido de uma matéria sutil, que as atravessa de todos os lados, e obriga sua estrutura a se dispor de modo que forneça a esse fluido a passagem mais aberta e fácil possível. (HUYGENS, 1986, p. 18-19).

Além disso, Huygens não via problemas em supor a propriedade de elasticidade para o éter: “Mas, supondo a elasticidade na matéria etérea, suas partículas terão a propriedade de

---

<sup>26</sup> Conhecido também como Pendulo de Newton é um dispositivo mecânico formado por cinco pêndulos adjacentes que demonstram a conservação do momento e a transferência de energia mecânica entre corpos. Apesar de ser nomeado a Newton, este dispositivo não foi criado por ele, sendo inventado no século XX.

restituir-se igualmente depressa, seja quando forem empurradas fortemente ou fracamente. Assim, o progresso da luz continuará sempre com uma velocidade igual.” (HUYGENS, 1986, p. 19).

Ver-se que a analogia mecânica semelhante ao berço de Newton, auxiliou Huygens a modelar o éter e suas propriedades, as quais, o modelo corpuscular de Newton não conseguia demonstrar.

Continuando em seus argumentos, Huygens apresentou a origem das ondas e maneira como se propagam:

[...] cada pequeno lugar de um corpo luminoso, como o Sol, uma vela ou um carvão ardente, gera ondas cujo centro é esse lugar. Assim, na chama de uma vela, sendo distinguidos os pontos A, B e C os círculos concêntricos descritos em torno de cada um desses pontos representam as ondas que deles provêm. (HUYGENS, 1986, p. 21).

Ele viu, que pela teoria corpuscular, não se conseguia explicar como os corpúsculos continuariam sua trajetória, sem se chocarem, então retorna para o modelo “berço de Newton” e sugere, engenhosamente, uma simulação em seu modelo, de como dois raios de luz se cruzariam sem um interferir na passagem do outro:

Não deve parecer inconcebível [...] que essa prodigiosa quantidade de ondas se achesse sem confusão e sem se apagarem umas às outras. É certo que uma mesma partícula de matéria pode servir a diversas ondas, provenientes de diferentes lados, ou mesmo de lados contrários [...]. Isso ocorre por causa do movimento que se propaga sucessivamente. Tal pode ser provado pela fila de bolas iguais, de matéria dura [...]. Se lançarmos contra ela, ao mesmo tempo, dos dois lados opostos, bolas semelhantes A e D, ver-se-á que cada uma retorna com a mesma velocidade que tinha inicialmente, e toda a fila permanece em seu lugar, embora o movimento tenha passado por todo seu comprimento, de forma dupla. Se esses movimentos contrários se encontrarem na bola B do meio, ou em alguma outra C, ela deve se contrair e se recuperar dos dois lados e assim servir ao mesmo tempo para transmitir esses dois movimentos. (HUYGENS, 1986, p. 21).

Mais à frente Huygens destaca

[...] é que, quando [as ondas luminosas] vêm de diversos lados, ou mesmo de sentidos opostos, produzem seu efeito uma através da outra sem qualquer impedimento. [...]. Segundo o que foi explicado sobre a ação da luz, como suas ondas não se destroem, nem se interrompem umas às outras quando se cruzam, esses efeitos que acabei de citar são fáceis de conceber. (HUYGENS, 1986, p. 24, grifo nosso).

Referente à propagação da luz a longas distancias, Huygens se deparou com situação de como os movimentos e corpúsculos se propagavam das estrelas e do sol até aos nossos olhos. Para isso, ele expos três aspectos que justificam a tal possibilidade de propagação. Primeiro:

[...] considerando-se que [...] uma infinidade de ondas, embora proveniente de diferentes pontos desse corpo, unificam-se [...] {em} uma só onda, que [...] deve ter força suficiente para se fazer sentir. (HUYGENS, 1986, p. 22).

Segundo:

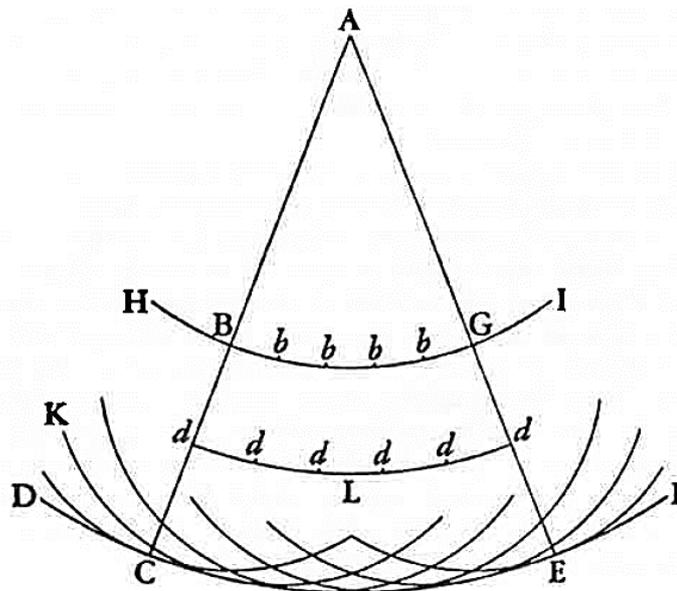
[...] de cada ponto luminoso podem provir muitos milhares de ondas ao menor tempo imaginável, pela frequente percussão dos corpúsculos, que atingem o éter [...] (HUYGENS, 1986, p. 22).

E terceiro:

[...] cada partícula de matéria atingida por uma onda não deve comunicar seu movimento apenas à partícula próxima que está na linha reta traçada do ponto luminoso; mas que ela também comunica necessariamente a todas as outras que a tocam, e que se opõem a seu movimento. De modo que deve ocorrer que em torno de cada partícula se produza uma onda da qual essa partícula seja o centro. (HUYGENS, 1986, p. 22).

Ainda no seu artigo, Huygens começa a tratar da luz com aspectos geométricos, que até então se caracterizava por uma onda mecânica se propagando em um meio elástico. Tais aspectos serão usados para explicar a reflexão e a refração:

**Figura 14** - Propagação retilínea da luz segundo Huygens



Fonte: HUYGENS, 1986, p. 23.

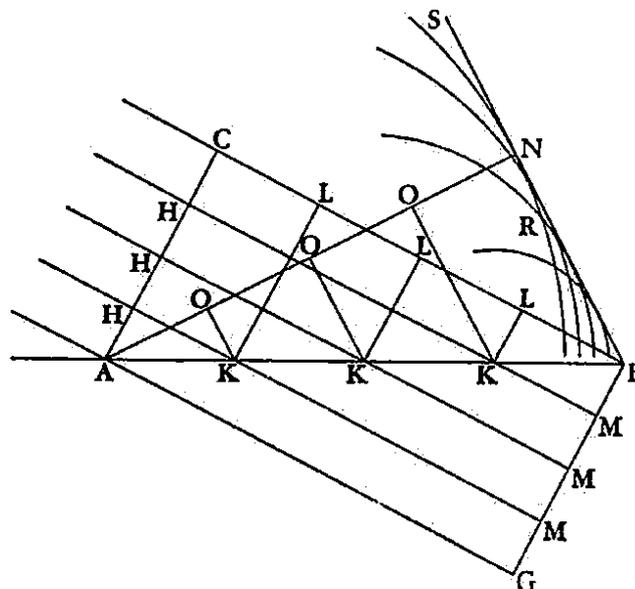
[...] uma onda emanada do ponto luminoso A [(figura 14)], que é o seu centro, a partícula B, uma das que estão compreendidas na esfera [...], produzirá sua onda particular [...], que tocará a onda DCF em C, no mesmo momento em que a onda principal, emanada do ponto A, tenha chegado a DCF. É claro que a onda {de proveniente de C} [...] tocará a onda DCF apenas no lugar C, que está na reta traçada por A e B. Da mesma forma, as outras partículas compreendidas na esfera [...], como bb, dd, etc., terão cada uma produzido sua onda. Mas cada uma dessas ondas não pode ser senão infinitamente fraca se comparada à onda DCF, para cuja composição todas as outras contribuem pelas partes de suas superfícies que estão mais afastadas do centro A. (HUYGENS, 1986, p. 23).

Usando da descrição anterior, Huygens explica a propagação retilínea da luz e descreve o que mais tarde se tornaria o princípio de Huygens

[...] notemos primeiramente que cada parte da onda deve se propagar de modo que as extremidades estejam sempre compreendidas entre as mesmas retas traçadas do ponto luminoso. Assim, a parte da onda BG, que tem o ponto luminoso A por centro, se propagará no arco CE, terminado pelas retas ABC, AGE. Embora as ondas particulares produzidas pelas partículas compreendidas pelo espaço CAE se espalhem também fora desse espaço, elas só concorrem no mesmo instante para compor, juntas, uma onda que limite o movimento na circunferência CE, que é sua tangente comum. Daqui se vê a razão pela qual a luz não se espalha senão por linhas retas - a menos que seus raios sejam refletidos ou rompidos - de modo que ela não ilumina um objeto a não ser quando o caminho desde sua fonte até esse objeto está aberto segundo tais linhas. (HUYGENS, 1986, p. 23, grifo nosso).

Sobre a reflexão da luz, Huygens descreveu como uma frente de onda de um pulso de luz, se chocando em uma superfície plana e polida, é refletida (ver figura 15). Primeiro, ele mostra a evolução do pulso, compreendida pela reta AC, que está dividida em quatro partes, com intervalos de tempos iguais. Depois, quando a frente de onda começa a tocar na superfície, uma onda particular é formada, e evolui numa esfera de raio AN. As ondas particulares, formadas pelos K em instantes de tempo diferentes, evoluirão com raios menores, mas terão seus diâmetros alinhados a uma tangente em comum BN. A partir dessa geometrização, ele pôde obter a igualdade entre os ângulos do raio incidente e o raio refletido, o que justifica o objetivo de Huygens ao fazer a construção geométrica da propagação retilínea da luz. (HUYGENS, 1986, p. 25-26).

Figura 15 - Reflexão segundo Huygens.



Fonte: HUYGENS, 1986, p. 25.

Apesar de considerar a superfície perfeitamente unida, Huygens acreditava que esse efeito se dava pela “continuidade”, composta pelas partículas do corpo refletor colocadas umas

próximas às outras, as quais são maiores do que as partículas da matéria etérea. E por causa disso, Huygens exemplifica com mercúrio, onde milhões de partículas deste elemento na menor superfície visível possível, se fossem arrumadas para formar um plano, veria a superfície igual a um vidro polido, mesmo que possuía algumas irregularidades. Ainda assim, os centros de todas as esferas particulares de reflexão estariam tão próximos que formariam um plano contínuo de reflexão, o que geraria uma tangente comum, suficientemente perfeita, para que se dê a produção da luz (HUYGENS, 1986, p. 28).

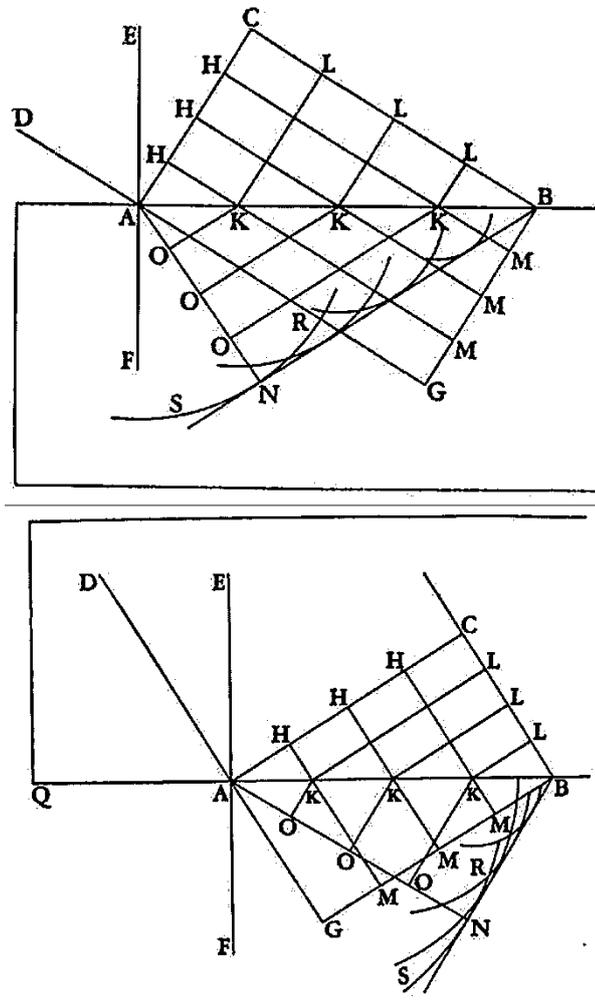
Antes de explicar a refração, Huygens precisa esclarecer a transparência dos corpos (tanto sólidos quanto líquidos), e como ocorreria a passagem da luz (ondas mecânicas pelo éter) nesses corpos. Para isso, ele propõe três formas de como conceber a transparência: a) as próprias partículas do corpo davam continuidade ao movimento das ondas no seu interior (transferência de momento do éter para o corpo), não precisando que a matéria etérea penetrasse no corpo (HUYGENS, 1986, p. 29); b) a matéria etérea preencheria os espaços internos do corpo transparente, e continuaria o movimento das ondas por ela, mas com uma velocidade de propagação menor, por causa de pequenos desvios sofridos ao passar pelas brechas que há entre as partículas do corpo transparente, que são maiores (tamanho) do que as partículas da matéria etérea (HUYGENS, 1986, p. 30). E c) o movimento das ondas de luz seriam transmitidas tanto pelas partículas etéreas quanto as partículas do corpo, simultaneamente ou não, mesmo que as partículas do corpo possuíssem uma elasticidade considerável, o progresso das ondas de luz será mais lento no interior do corpo (HUYGENS, 1986, p. 31).

Huygens usa a hipótese b) para explicar a causa da redução da velocidade da luz a refração e a hipótese c) para explicar a dupla refração em certos corpos, como o cristal-da-Islândia.

De forma semelhante, Huygens descreve processo de refração partindo de um pulso de luz, em forma de frente de onda, se chocando em uma superfície plana onde é refratado (ver figura 16). Primeiro, ele mostra a evolução do pulso compreendida pela reta AC, que está dividida em quatro partes, com intervalos de tempos iguais. Depois, quando a frente de onda começa a tocar na superfície, uma onda particular é formada, e evolui numa esfera de raio NA, só que a propagação será para dentro do material transparente. As ondas particulares, formadas pelos K em instantes de tempo diferentes, evoluirão com raios menores, mas terão seus diâmetros alinhados a uma tangente em comum BN, que representa a onda refratada (HUYGENS, 1986, p. 33). Huygens explica o processo de refração tanto para a passagem dos raios de luz de um meio com índice de refração menor para outro de índice maior (figura 16:

de cima), quanto do meio maior índice para um de menor índice de refração (figura 16: de baixo).

Figura 16 - Refração segundo Huygens



Fonte: HUYGENS, 1986, p. 33 e 35.

Huygens não discute no Tratado um dos aspectos da luz – a formação das cores, motivo, no qual, ele escreve no prefácio de seu trabalho:

Espero também que existam aqueles que, seguindo esse início, entrarão nesse assunto mais profundamente do que fui capaz, pois falta muito para ele ser esgotado. Isso aparece nos lugares que indiquei, onde deixo as dificuldades sem resolução; e ainda mais pelas coisas que nem mesmo toquei, como os corpos brilhantes de vários tipos, e tudo o que se refere às cores - campo em que ninguém até agora pôde se vangloriar de haver obtido sucesso. (HUYGENS, 1986, p. 6-7, grifo nosso).

Na época que Huygens estava escrevendo o *Tratado sobre a Luz*, Hobert Hooke já havia publicado seu trabalho *Micrographia* (1669), onde ele apresentou uma descrição sobre a formação das cores explicadas com características ondulatórias. Newton publica 1672 seu primeiro artigo que causou grande debate. Ele recebe crítica de Ignace-Gaston Pardies (1636-

1673) por não haver compreendido a necessidade de inserção de hipóteses novas sobre constituição da luz branca, como resultado de seu descuido com a posição correta do prisma no experimento (SILVA e MARTINS, 1996, p. 317, nota 24). Recebeu críticas de Lucas sobre o *experimentum crucis* que, em resposta, Newton refuta dizendo que seu objetivo era de mostrar a refrangibilidade da luz. Recebeu também crítica de Hooke sobre o *experimentum crucis* que, rebatendo a sua crítica, responde dizendo que a sua intenção era de mostrar os raios de cores diferentes, separadamente, sofrem refrações diferentes, sem a necessidade de adicionar um fator extra para isto (separação, rarefação ou dilatação de qualquer tipo) (SILVA e MARTINS, 1996, p. 318-319, nota 31).

Hooke defendia que “a luz branca era uma perturbação periódica e que a luz colorida era uma modificação adquirida da luz branca ao ser refratada obliquamente” e Newton descreveu que “a luz branca composta assim produzida [pela recombinação das cores] era visivelmente igual a luz solar” (MARTINS e SILVA, 2015, p. 22). No entanto, nem o experimento de recombinação das cores por uma lente (experimento feito por Newton, descrito no *Novo tratado sobre luz e cores*) nem o *experimentum crucis* provaram que a luz resultante da combinação era realmente igual a luz solar. Isto justifica tal embate de Hooke ao trabalho de Newton.

Ainda recebeu crítica de Huygens sobre a luz branca, pois para ele havia a possibilidade de criação da luz branca usando apenas amarelo e azul espectral. Em resposta a isto, Newton discorda do fato, comentando que se houvesse essa luz branca ela seria diferente da luz solar (SILVA e MARTINS, 1996, p. 322, nota 53).

Após a publicação do artigo, vários autores escreveram cartas para Royal Society relatando os insucessos que obtiveram ao refazerem os experimentos descritos por Newton, ou sugerindo outros experimentos para refutar a sua teoria. Para resolver esse impasse, o próprio Robert Hooke foi encarregado de realizar os experimentos descritos no artigo de Newton diante da Royal Society, conseguindo reproduzir os experimentos sem nenhum problema. Apesar de estarem corretos, Hooke não se deixou convencer sobre a teoria de Newton (SILVA e MARTINS, 1996, p. 325, nota 67). Como resultado, o grande embate da composição da luz não proporcionou um esclarecimento da natureza das cores.

Apesar da participação de Huygens na discussão, todos os envolvidos na problemática esperavam que ele apresentasse uma teoria das cores ao publicar o *Tratado sobre a luz*, o que demonstrou Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) ao escrever uma carta de julho de 1690. No entanto, em agosto do mesmo ano, Huygens enviava uma resposta a Leibniz dizendo:

Nada falei sobre as cores em meu *Tratado sobre a Luz* (08/01/1690), achando esse assunto muito difícil, sobretudo por causa de tantas maneiras diferentes pelas as quais as cores são produzidas, o Sr. Newton, que vi no verão passado na Inglaterra, prometeu algo sobre isso, e me comunicou algumas experiencias muito belas das que havia feito. (HUYGENS, 1986, p. 7, nota 3).

Entre os anos 1725 e 1726, durante as suas observações, James Bradley (1693-1762) percebeu uma variação pequena na posição da estrela Gama da constelação do Dragão quando estava fazendo as medidas de paralaxe astronômica das estrelas fixas. No entanto, os resultados teóricos de paralaxe da estrela não estavam de acordo seus dados observacionais. Em 1727, Bradley explica que essa diferença seria causada pelo movimento de translação da terra, pois a velocidade da Terra varia durante o percurso. Caso a velocidade fosse constante, o efeito nunca poderia ser observado. Assim o fenômeno foi nomeado de aberração das estrelas fixas, e tais resultados contribuíram para indicar que a luz, vinda das estrelas, demorava um tempo finito para chegar a terra. Esse fenômeno irá suscitar muitas controvérsias nos séculos seguintes (OLIVEIRA, 1993, p. 158; MARTINS, 2012, p. 56).

Como consequência da popularidade dos feitos Newton, a teoria corpuscular da luz foi amplamente difundida pela Europa durante o século XVIII. Já no final do século XVIII, a teoria se tornou alvo de críticas e seus problemas conceituais se tornaram mais evidentes. Vários filósofos da época tentaram aperfeiçoar a teoria corpuscular e defende-la dos argumentos contrários. As questões mais discutidas focavam na perda na massa do sol, pois se sol estava emitindo constantemente partículas de luz, perdendo sua massa, o que resultaria na sua extinção e a redução da “atração gravitacional” no sistema solar; e a não-detecção de momento nos corpúsculos de luz.

A resposta encontrada pelos defensores da teoria corpuscular, para a perda da massa do sol, foi que eventuais quedas de cometas estariam recompondo a massa perdida (considerando também outros mecanismos de recomposição). Quanto ao momento dos corpúsculos, alegavam que havia sido comprovada experimentalmente, mas que foi derruba por outros experimentos da época (MOURA e BOSS, 2015, p. 6, nota 17). Houve também uma grande aproximação ente da teoria corpuscular com a Química, o que favoreceu a existência da teoria corpuscular para luz por mais algum tempo. (MOURA e BOSS, 2015, p. 15, nota 69).

### 3.2 Young e Fresnel

No início do século XIX, ocorreu uma retomada da teoria ondulatória para a luz com a publicação da “*Teoria Sobre Luz e Cores*” de **Thomas Young (1773-1829)** em 1802. Nesse

artigo, Young expos uma teoria vibracional para explicar a luz, a formação das cores, e a formulação inicial do princípio da interferência da luz. Sua teoria ainda não era expressa como teoria ondulatória propriamente dita, por apresentar ausência dos conceitos de frequência e comprimento de onda, que são necessárias para explicar alguns fenômenos da luz (MOURA e BOSS, 2015, p. 2, nota 3).

A argumentação do artigo está baseada nos discursos de filósofos naturais, principalmente em Newton, que respaldam sua teoria, estruturada em 4 hipóteses e 9 proposições plausíveis sobre a natureza luz. Para Young, as hipóteses propostas eram elementos necessários para validar o seu pensamento, sendo que todas foram justificadas com citações diretas de retiradas dos trabalhos de Newton.

O objetivo de Young com o artigo não era de propor opiniões novas, mencionar teorias que já avançaram, ou produzir experimentos, mas destacar fatos que ainda não eram observados e que, em sua visão, estariam de acordo com a teoria ondulatória em vários fenômenos da natureza, como ele declara na seguinte passagem do *Tratado*:

Um exame mais extensivo dos vários escritos de Newton tem me mostrado que ele foi de fato o primeiro a sugerir uma teoria tal qual a que eu vou me empenhar a sustentar; que suas opiniões diferem menos desta teoria [ao contrário do] que é agora quase universalmente suposto; e que uma variedade de argumentos tem sido elaborada, como se [quisessem] refutá-lo, podendo ser encontrada de maneira quase similar a partir de seus próprios trabalhos [...] (MOURA e BOSS, 2015, p. 6).

Mais à frente, ele complementa dizendo que “depois de discutir brevemente cada assunto particular a minha teoria, eu citarei, a partir dos vários escritos de Newton, trechos que parecem ser mais favoráveis à sua aceitação” (MOURA e BOSS, 2015, p. 6, grifo nosso). Observa-se durante o seu trabalho que Young fez destaques de trechos específicos dos escritos de Newton, por perceber neles indícios (ou evidências) de propriedades ondulatórias ou vibracionais que apoiariam indiscutivelmente a sua teoria. Outro ponto a destacar são as interpretações que podemos fazer deste trabalho. Infelizmente, não podemos inferir (concluir) que Newton teria sugerido a concepção ondulatória, pois isto pode trazer equívocos históricos e, conseqüentemente, uma ideia distorcida da teoria de Newton. Além disso, as passagens de Newton, usadas por Young, foram tratadas fora do seu contexto original, como se apresentam nos trabalhos e documentos de Newton. (MOURA e BOSS, 2015, p. 6-7, nota 20 a 22).

Em sua Hipótese I, Young declarou que “um Éter luminífero permeia o Universo, altamente rarefeito e elástico.” (MOURA e BOSS, 2015, p. 7). Para justificar tal fato, ele cita

que as vibrações no éter são uteis e necessárias (*Carta de Newton a Hooke*)<sup>27</sup>; e que o meio etéreo seria mais ralo, sutil e fortemente elástico, sendo composto pelo corpo sereno do éter e por outros espírito etéreos (*A hipótese da luz*); onde, também, o calor pode ser transmitido através do vácuo pelas vibrações nele, sendo pelo éter a ocorrência da refração e reflexão da luz, podendo penetrar em todos os corpos (*Questão 18, Optica*); e os planetas e os cometas, e todos os grandes corpos, executar seus movimentos nele (*Questão 22, Optica*).

Na Hipótese II, Young diz que “Ondulações são excitadas neste Éter assim que o Corpo torna-se luminoso.” (MOURA e BOSS, 2015, p. 7). Para justificar, ele citou que a luz seria capaz de provocar vibrações no éter; essas vibrações seriam muito velozes e pequenas, com uma distância curtíssima entre as vibrações; podendo ter vários tipos de “tamanhos” e a mesma velocidade de propagação para todas (*A hipótese da luz*); a luz pode causar ondas de vibração no corpo transparente, no processo de reflexão e refração; e que ultrapassando os raios de luz, colocam nos estados de fácil reflexão e fácil transmissão (*Questão 17, Optica*); podendo estes estados ser definidos na emissão do raio de luz, antes de incidir no corpo transparente e carregado durante o percurso (*Proposição 13, Livro II, Optica*).

Na explicação dessa hipótese, Young declarou que não fez uso do termo “vibração” por este ser um movimento alternado (para traz e para frente) e que o termo apropriado seria ondulação que, além de ser um movimento de caráter vibratório, é transmitido sucessivamente, o que representa melhor a sua ideia.

Já na Hipótese III, Young declarou que “A Sensação de diferentes Cores depende das diferentes frequências de Vibrações, excitadas pela Luz na Retina” (MOURA e BOSS, 2015, p. 8). Para justificar o fato, ele cita que as vibrações no éter, causadas pela agitação dos corpos, propagam-se em linha reta em todas as direções, e produzem a sensação de luz ao chocarem (e baterem) contra o fundo do olho; os vários tipos de tamanhos das vibrações são separados no processo de refração, como ocorre para luz branca onde os raios de várias cores estão misturados, sendo isto responsável pelo fenômeno no prisma e em substâncias refratoras; as vibrações maiores geram a sensação do vermelho, as menores a sensação de violeta intenso, e as vibrações intermediárias geram as sensações de cores intermediárias; a reflexão das cores em filmes finos estão relacionadas com a espessura do filme, mais espessa tende para o vermelho, mais fina tende para o azul (*Carta de Newton a Hooke*).

---

<sup>27</sup> A inscrições entre parênteses, que estão em itálico, são as referências bibliográficas que Young destacou dos escritos de Newton, e que estão presentes no artigo. Optamos por essa estrutura para evidenciar melhor os recortes de Young, e se farão mais presentes a diante.

Continuando com seus argumentos Young destacou que o “tamanho” dos raios de luz, e a sua força (ou a potência) são diretamente proporcionais as vibrações nas superfícies refletora, ou seja, diretamente relacionadas; as vibrações causadas pelo choque de luz no olho, são transmitidas da retina pelo nervo ótico até o cérebro (*A hipótese da luz; Questões 13, 14 e 16 - livro III, Optica*).

Na explicação desta hipótese, Young declarou que era provável que o movimento na retina fosse de caráter vibratório, sendo que a frequência das vibrações depende da sua constituição. Ele supõe que a existência de três tipos de pontos sensitivos na retina, que vibram em harmonia com as vibrações possíveis. Esses pontos são, para ele, o vermelho, o amarelo e o azul, os quais fazem parte do filamento do nervo ótico. As demais cores são a combinação dessas cores primárias (MOURA e BOSS, 2015, p. 9).

Vemos que Young descreve o processo de como enxergamos o mundo, apresentando um grau de semelhança muito próximo da concepção atual. Comparando-a com a descrição atual, ao invés das vibrações na retina, temos o processo fotoquímico que transforma a luz em pulsos elétricos. Os pontos sensitivos na retina, são os conhecidos cones (células fotorreceptoras), que pela sua classificação de cor, Young teria seguido a teoria das cores para pigmentos (Vermelho, Amarelo e Azul), pois ainda não havia conhecimento das cores primárias para a luz (Vermelho, Verde, Azul), e por isso vemos o uso do amarelo ao invés do verde. As demais cores são identificadas pelas proporções que possuem das cores primárias.

Na hipótese IV, ele propõe “Todos os Corpos materiais têm uma Atração pelo Meio etéreo, através da qual ele é acumulado dentro de suas Substâncias e por uma pequena Distância ao redor deles, em um Estado de maior Densidade, mas não de maior Elasticidade.” (MOURA e BOSS, 2015, p. 10). Young comenta que esta hipótese não estaria classificada como fundamental na sua teoria, em relação as três hipóteses anteriores, mas por ser simples e a melhor que conseguiu formular. No entanto, Young deve ter percebido, nos anos seguintes, que essa hipótese trazia problemas, rejeitando-a completamente de sua teoria, a partir de 1803. Ele propôs, então, que o éter passaria livremente pelos corpos, sem sofrer qualquer atração (MOURA e BOSS, 2015, p. 10, nota 33).

Ainda no artigo, Thomas Young apresentou 9 proposições para a sua teoria, das quais algumas destacaremos a seguir.

A proposição I dizia que “Todos os Impulsos são propagados em um Meio homogêneo elástico com igual Velocidade.” (MOURA e BOSS, 2015, p. 10). Para Young a velocidade de propagação das ondulações no éter seria a mesma para todas as cores, alterando apenas o

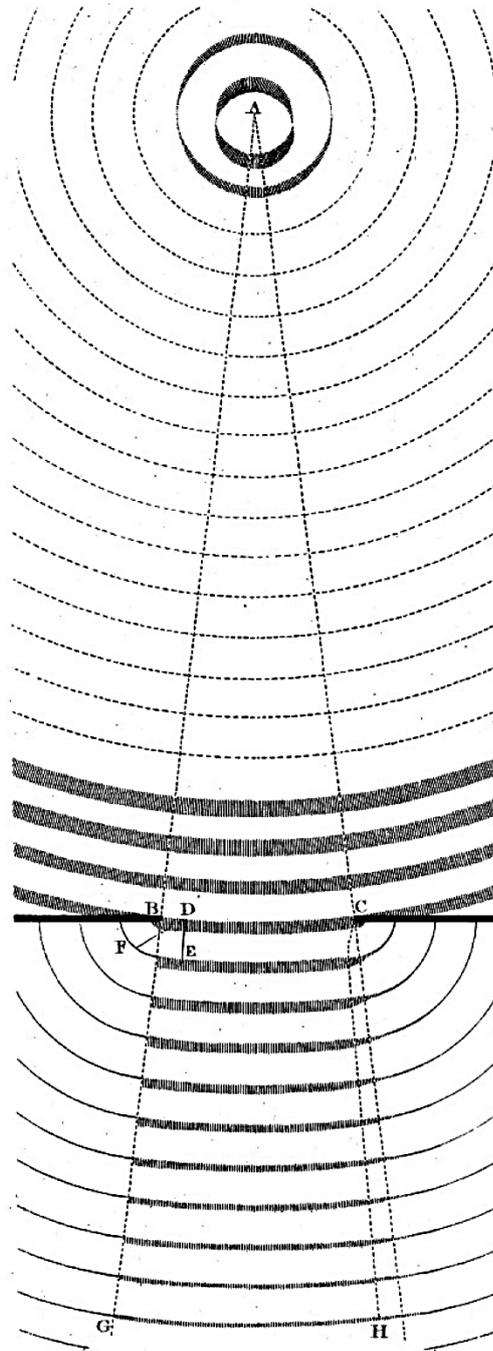
tamanho das ondulações, como ele destaca do artigo *A hipótese da Luz* no escopo da Hipótese II.

Na proposição II, Young apresentou que “Uma Ondulação originada a partir da Vibração de uma única Partícula, deve se expandir através de um Meio homogêneo em uma forma Esférica, mas com quantidades diferentes de Movimento em diferentes Partes.” (MOURA e BOSS, 2015, p. 10-11). Ele discursa que para uma ondulação prosseguir em seu trajeto, ela teria de ter uma tendência de preservar o seu movimento em linha reta, sendo que partes da ondulação deveria ter percorrido distancias iguais em tempos iguais, como acontece com uma onda circular de água. Para provar que as partículas do meio propagam uma ondulação distinta em todas as direções.

Já proposição III, destaca-se que “Uma Porção de Ondulação esférica, passando através de uma Abertura em um Meio em repouso, ser propagada retilineamente em Superfícies concêntricas, terminadas lateralmente por Porções fracas e irregulares de novas Ondulações divergentes.” (MOURA e BOSS, 2015, p. 11). Nesta proposição Young vai mostrar que o desvio da luz sofre ao passar por uma abertura é imperceptível, e a sua propagação continuaria em linha reta:

Deixe as linhas concêntricas na Fig. [17] representarem o caso atual das partes similares de um número de ondulações sucessivas divergindo do ponto A. [...]. Deixe a força de cada ondulação ser representada pela largura da linha e deixe o cone de luz ABC ser admitido através da abertura BC. Assim, as ondulações principais procederão em uma direção retilínea em direção a GH, e as radiações fracas de cada lado divergirão a partir de B e C como centros, sem receber qualquer força adicional de qualquer ponto intermediário D da ondulação [...]. Mas, se permitirmos alguma pouca divergência lateral das extremidades das ondulações, ela deve diminuir suas forças, sem adicionar materialidade àquelas de luz dissipada; e suas terminações assumirão a forma CH, ao invés da linha reta BG; uma vez que a perda de força é mais considerável perto de C que em distâncias maiores. Esta linha corresponde ao limite da sombra da primeira observação de Newton (Fig. [17]). [...]. Em outras circunstâncias, a divergência lateral parecerá aumentar espessura do feixe, ao invés de diminuí-la (MOURA e BOSS, 2015, p. 12).

**Figura 17** - Passagem das ondulações luminosas por uma abertura de Thomas Young



Fonte: MOURA E BOSS, 2015, p. 12.

Desta forma, Young consegue justificar que a concepção vibracional para a luz não refutaria a sua propagação linear. Além disso, ele comenta que “nenhum experimento com a luz pode ser feito nessas circunstâncias, por conta da pequenez de suas ondulações e a interferência da inflexão [difração]” (MOURA e BOSS, 2015, p. 12).

Em relação a inflexão, pode ser observado a formação de algumas franjas dentro da sombra geométrica do objeto, que para Young era possível. No entanto, tal fato não poderia ser

explicado pela teoria corpuscular da luz, pois implicaria em admitir que a luz se curvaria em direção da sombra. Mesmo que Newton tivesse feito experimentos de difração (que poderia ter ocorrido em algum momento após 1685) descritos no Livro III do *Optica*, ele não veria nenhuma franja interna, por não ter condições experimentais de observá-la. Ainda que fizéssemos tais experimentos, conforme descrito no *Optica*, teríamos dificuldade de vê-las. Desta forma, Newton teria chegado à conclusão de que a luz não se curvaria em direção as sobras dos objetos (MOURA e BOSS, 2015, p. 12, notas 51 e 52).

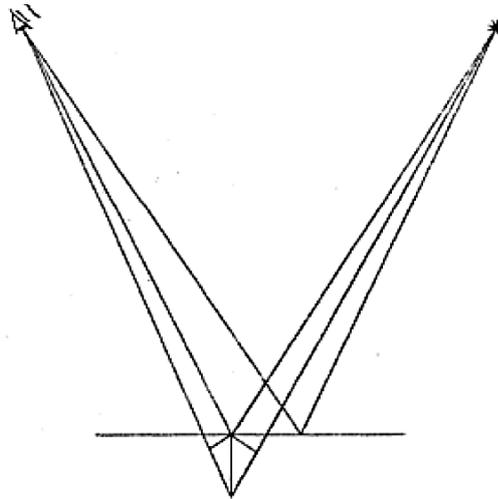
Young destacou também, de *Optica* de Newton, que

[...] se consistisse em pressão ou movimento propagado ou num instante ou no tempo, ela se curvaria para a sombra. Pois pressão ou movimento não podem ser propagados em um fluido em linhas retas além de um obstáculo que intercepta parte do movimento, mas se curvarão e se espalharão em todas as direções do meio quiescente que está além do obstáculo. [...]. As ondas sobre a superfície da água estagnada, ao passarem perto dos lados de um objeto largo que intercepta uma parte delas, curvam-se depois e dilatam-se gradualmente para dentro da água estagnada por trás do obstáculo. [...]. Mas nunca se soube de a luz seguir passagens curvas nem de se curvar para a sombra. [...]. Os raios que passam muito próximos das bordas de qualquer corpo são um pouco curvados pela ação do corpo [...]; mas essa curvatura não se dá em direção à sombra, mas a partir da sombra, e é executada apenas na passagem do raio perto do corpo e a uma distância muito pequena dele. Tão logo o raio tenha passado pelo corpo, segue em linha reta. (*Questão 28, Optica*) (MOURA e BOSS, 2015, p. 13)

Já na proposição V descreve “Quando uma Ondulação é transmitida através de uma Superfície que limita diferentes Meios, ela procede em uma certa Direção, tal que os Senos dos Ângulos de Incidência e Refração estão na constante Razão da Velocidade de Propagação nestes dois Meios.” (MOURA e BOSS, 2015, p. 14). Nessa proposição, Young indicou passagens dos trabalhos de Issac Barrow (1630-1677), Huygens e Euler, demonstrações que confirmavam a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão na visão da sua teoria vibracional.

Na proposição VIII, Young declarou o seu princípio da interferência que diz “Quando duas Ondulações, a partir de diferentes origens, coincidem perfeitamente ou quase [coincidem] em Direção, seu efeito conjunto é uma Combinação dos Movimentos pertencentes a cada uma [delas].” (MOURA e BOSS, 2015, p. 16). Para justificar esta proposição, ele descreve o seguinte experimento ilustrado na figura 18:

**Figura 18** - Ilustração do experimento da proposição VIII



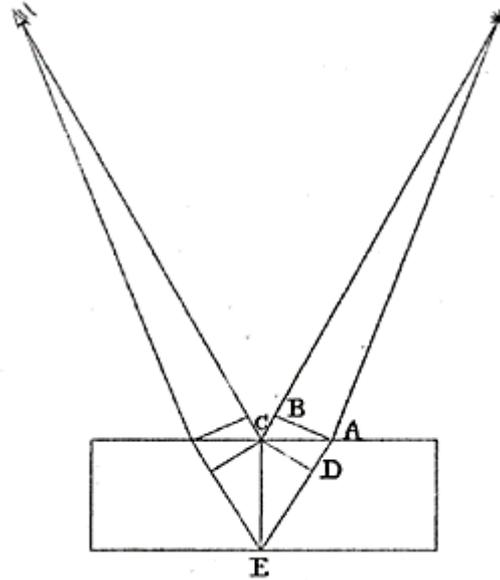
Fonte: MOURA e BOSS, 2015, p. 16.

Deixe em um determinado plano dois pontos refletores muito próximos um do outro, e deixe o plano situado e modo que a imagem refletida de um objeto luminoso visto nele possa parecer coincidir com os pontos. Então, é óbvio que o comprimento do raio incidente e refletido [...] é igual em relação a ambos os pontos, considerando-os capazes de refletir em todas as direções. [...] deixe um dos pontos rebaixado abaixo do plano. [...] o caminho da luz refletida a partir dele, será alongado por uma linha que está para a depressão do ponto [...] a reflexão a partir do ponto rebaixado interferirá com a reflexão [originada] a partir do ponto fixo, de forma que o movimento progressivo de uma coincidirá com o movimento retrógrado da outra, e ambas serão destruídas. [...] quando esta linha é igual à distância completa de uma ondulação, o efeito será dobrado. [...] quando [for] um comprimento e meio, [será] novamente destruída. [...] se as ondulações refletidas forem de diferentes tipos [...] serão afetadas de diferentes modos, de acordo com as suas proporções para os vários comprimentos da linha [...], e que pode ser denominado [como] o intervalo de retardamento. (MOURA e BOSS, 2015, p. 16).

Essa explicação, Young faz para formação das cores em superfícies com ranhuras superficiais. É interessante notar que Young descreve as condições de interferência construtiva e destrutiva, quando se refere à distância de uma ondulação.

Para a formação das cores de filmes finos e expressos (ver figura 19), ele usa a mesma ideia de reflexão de dois pontos, estando um rebaixado em relação ao outro (pontos *C* e *E*). Ao invés dos pontos estarem afastado entre si, ambos estão um embaixo do outro. E o comprimento da linha reta *CE* (intervalo de retardamento), será a distância entre as duas superfícies refletora (ou a espessura do próprio filme).

**Figura 19** - Ilustração da formação das cores de filmes finos ou expressos



Fonte: MOURA e BOSS, 2015, p. 17.

Por fim na proposição IX ele diz “Luz Radiante consiste em Ondulações de Éter Luminífero” (MOURA e BOSS, 2015, p. 20). Para justificar a proposição Young declara que o aumento ou diminuição da luz está diretamente relacionada com aumento ou diminuição das ondulações, as quais estão presentes nos fenômenos da luz. Assim, ele conclui que as ondulações são luz.

Depois de toda a discussão do trabalho *Teoria sobre luz e cores* de Young, surge uma questão importante: Onde está a descrição do fenômeno da dupla refração? Os livros didáticos relatam que Young fez o experimento da dupla fenda nessa época. Uma leitura de todos os trabalhos de Young publicados no período de 1800 a 1805 (o que inclui *Teoria sobre luz e cores*), apresentam nenhuma descrição de tal experimento. Afinal de contas onde estaria a essa descrição? Estas indagações, responde-se em um período da vida de Young, que os livros didáticos não relatam, iniciado em 1800.

Quando voltou para Londres em 1800, Thomas Young foi convidado para ministrar aulas de Física na *Royal Institution*. Ele passou dois anos na instituição e depois se demitiu alegando que o trabalho estava interferindo em sua profissão de médico. Durante esse tempo, ministrou trinta e uma palestras domésticas, que tinha o caráter popular de mostrar os avanços na ciência e suas aplicações. As notas foram publicadas em 1907, na forma de livro, intitulado “*A course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*”, que na verdade, contém sessenta palestras (ROTHMAN, 2005, p. 40-41).

No final da palestra de vinte e três, “*Sobre a Teoria da Hidráulica*”, Young relata a construção do tanque de ondas, onde se cria as ondas de água e observa seu comportamento, e

faz uma descrição do padrão de interferência produzido por duas ondas circulares criadas simultaneamente, apresentando um diagrama desse padrão de interferência visto de cima. A ilustração de interferência de Young, reproduzida mundialmente, não é o sobre padrão de interferência da luz, mas sim da água (ROTHMAN, 2005, p. 41).

Já na palestra de trinta e nove, “*Sobre a Natureza da Luz e das Cores*”, Young retorna para o fenômeno da interferência, onde ele se refere ao experimento da interferência da palestra vinte e três:

Supondo que a luz de qualquer cor consiste de ondulações de uma dada amplitude, ou de uma determinada frequência, segue-se que essas ondulações devem ser passíveis de efeitos que já examinamos no caso das ondas de água e dos pulsos de som. Foi demonstrado que duas séries iguais de ondas, procedentes de centros próximos um do outro, podem destruir os efeitos uns dos outros em certos pontos, e em outros pontos redobrar-lhes; e a batida de dois sons foi explicada por uma interferência similar. Estamos agora a aplicar os mesmos princípios à alternada união e extinção de cores.

Para que os efeitos de duas porções de luz possam ser combinados então, é necessário que eles sejam derivados da mesma origem, e que eles cheguem ao mesmo ponto por caminhos diferentes, em direções que não se desviem muito uma da outra. Esse desvio pode ser produzido em uma ou em ambas as partes por difração, por reflexão, por refração ou por qualquer um desses efeitos combinados; mas o caso mais simples parece ser, quando um feixe de luz homogêneo incide sobre uma tela na qual existem dois furos (orifícios) muito pequenos ou fendas, os quais podem ser considerados como centros de divergência, de onde a luz é difratada em todas as direções. Neste caso, quando os dois feixes recém-formados são recebidos sobre uma superfície, colocada de forma a interceptá-los, a sua luz está dividida por listas escuras em porções aproximadamente iguais, porém tornam-se mais largas à medida que a superfície é afastada das aberturas, de forma a subtender ângulos quase iguais das aberturas em todas as distâncias, e mais largas também na mesma proporção em que as aberturas estão mais próximas umas das outras. O meio das duas porções é sempre claro, e as listas brilhantes de cada lado estão a tais distâncias, que a luz que chega até elas a partir de uma das aberturas, deve ter percorrido por um espaço maior do que o que vem do outro, por um intervalo que é igual à largura de uma, duas, três ou mais das supostas ondulações, enquanto os espaços escuros interpostos correspondem a uma diferença de metade de uma suposta ondulação, uma [ondulação] e meia, de duas [ondulações] e meia, ou mais (YOUNG, 1845, p. 364, tradução nossa; ROTHMAN, 2005, p. 41-42).

Na descrição acima, vê-se uma descrição do que seria o experimento da dupla fenda e da interferência luminosa. No entanto, não se observa em algum momento Young admitindo que realizou ou não o experimento da dupla fenda para luz. Observar-se também (onde destacamos por sublinhado) que o seu objetivo era aplicar o mesmo raciocínio de interferência das ondas de água e a noção de interferência sonora, na explicação da interferência luminosa. Além disso, essa descrição não condiz com seu estilo de relato experimental, que era de natureza detalhista (ROTHMAN, 2005, p. 43).

Também não vemos na descrição desta palestra nenhum diagrama dos padrões de interferência da luz, que é atribuído a Young. Se olharmos em seus trabalhos publicados na

*Philosophical Transactions* e na *Bakerian Lecture*, não vemos a menção da experiência da dupla fenda para a luz. Assim, não podemos afirmar com certeza se ele fez ou não o experimento.

Em 1804, Young propõe uma hipótese para o fenômeno da aberração das estrelas, pois analisando a teoria luminosa de Huygens trazia alguns problemas de interpretação: a dedução do fenômeno não era obtida diretamente da teoria - sendo necessária uma suposição adicional na teoria. Tal suposição atribui ao éter uma imobilidade total no espaço e não sendo influenciado pelo movimento da Terra (OLIVEIRA, 1993, p. 161).

Durante essa época, Pierre-Simon Laplace (1749-1827) observou que existia um problema na teoria corpuscular da luz: por mais que o fenômeno da aberração das estrelas fosse compatível com a teoria, o ângulo de aberração obtido de várias estrelas era sempre o mesmo, implicando que a velocidade da luz no espaço seria constante. Isto trazia uma incompatibilidade na teoria corpuscular da luz, pois a velocidade de propagação dos corpúsculos dependia da distância e das dimensões das fontes luminosas.

Para resolver este problema Laplace coordenou um estudo sistemático, realizado por Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e **François Jean Dominique Arago (1786-1853)**, para observar o fenômeno da aberração estelar. A primeira verificação ocorreu em 1806, onde o objetivo era verificar se não existia diferença nas velocidades da luz emitidas pelas estrelas. Seus resultados confirmaram que a velocidade da luz era constante, permanecendo a incompatibilidade com a teoria, os quais foram apresentados na Academia de Ciências de Paris (OLIVEIRA, 1993, p. 162).

Em janeiro 1808, a Academia de Ciências de Paris propôs como tema para premiação de 1808, o estudo matemático da dupla refração e a sua confirmação experimental. **Etienne-Louis Malus (1775-1812)** concorre à premiação apresentando os resultados de observações que havia feito. Ele observou que as duas imagens produzidas pela dupla refração variavam de intensidade quando o cristal-da-Islândia era rotacionado na direção do raio solar refletido nas janelas do Palácio de Luxemburgo, chegando uma delas desaparecer. Mas, quando se fazia essa observação diretamente para ao sol, não se via a variação de intensidade (BASSALO, 1989, p. 39).

Com isso, Malus iniciou um estudo experimental de incidência de luz em outros objetos transparentes. Ele descobriu que o mesmo fenômeno que observara dos raios refletido nas Janelas do Palácio de Luxemburgo acontecia na água também. Quando o feixe de luz era incidido na superfície da água, uma parte dos raios era refletida e outra era refratada, porém os raios refletidos só apresentavam a diminuição da intensidade da luz na rotação do cristal

(características de polarização), com um ângulo de  $52^{\circ}45'$  para o raio incidente. Se a seção principal do cristal estivesse paralela com a superfície refletora, surgia o raio ordinário e se essa tivesse perpendicular à superfície, surgia o raio extraordinário. Dessa forma, Malus descobriu a polarização por reflexão. Além disso, ele observou que o raio refratado, também apresentava a diminuição da intensidade da luz na rotação do cristal (polarizado), sendo mais intenso quando a seção principal do cristal tivesse perpendicular à superfície de refração.

Para explicar a “polarização” da luz, Malus apresentou uma explicação mecânico-corpuscular para o fenômeno. Para ele os raios de luz seriam moléculas arredondadas (mas não esféricas), que apresentava três eixos ortogonais: **a**, **b** e **c**, de tamanhos desiguais, sendo o eixo **a** o maior e estando orientado para trajetória. Quando a luz natural incidia em uma superfície refletora no ângulo de polarização, as forças de repulsão da superfície refletiriam parte das partículas, as quais seus eixos **b** e **c**, que estavam desorientados, são reorientados paralelamente entre si, de acordo com seus respectivos eixos. (Semelhante, ao processo de orientação magnética, produzida por um ímã, em partículas magnetizadas). Assim, as partículas luminosas ele denominou de moléculas polarizadas e ao fenômeno chamou de reflexão por polarização (BASSALO, 1989, p. 40-41).

Já a dupla refração, Malus explica que as partículas refratadas, que teriam o seu eixo **b** orientado perpendicularmente as forças repulsivas da superfície de refração, seriam refratadas como raio ordinário. Da mesma forma, as partículas com o eixo **c** orientado perpendicularmente as forças repulsivas, seriam refratadas com raio extraordinário.

Como um dos objetivos da premiação era a explicação matemática do fenômeno, assim ele precisou desenvolvê-la. Empiricamente, Malus encontra uma expressão analítica que permite calcular a intensidade da luz emergente do cristal, sendo dada por

$$\frac{I_{saida}}{I_{entrada}} = \cos^2 \theta. \quad (1)$$

onde a  $I_{saida}$  é a intensidade da luz depois de passar pelo cristal-da-Islândia;  $I_{entrada}$  é a intensidade antes de passar o cristal e  $\theta$  é o ângulo formado pela rotação do cristal em duas posições distintas. Dessa forma, Malus ganha a premiação da Academia de Ciências de Paris em 1810, com a apresentação final de seu trabalho sobre a polarização da luz.

Em 1810, François Arago volta a realiza a segunda verificação da desigualdade no desvio da luz, onde tentou pela refração da luz da estrela em um prisma, para evidenciar alguma desigualdade no desvio dessa luz. Assim, ele fez medições dos ângulos dos raios incidentes no prisma que está sobre a terra (referencial), considerando que a velocidade destes raios podia ser adicionada pela velocidade da Terra quando se aproxima de uma estrela, ou subtraída – quando

a terra se afastava de uma estrela. Comparando os dados deveria obter desvios angulares diferente, sendo que o ângulo na primeira situação seria maior do que segunda. No entanto, Arago encontrou um resultado nulo, ou seja, ambos os desvios angulares eram praticamente iguais. Desta forma, o resultado contradizia novamente a teoria corpuscular da luz, expondo um ponto fraco da teoria, que se tornou mais evidente com esse segundo resultado experimental (OLIVEIRA, 1993, p. 162).

Em 1815, **Augustin-Jean Fresnel (1788-1827)** inicia seus estudos sobre a interferência da luz, sobre a influência de seu amigo Arago, quando este veio a discutir as experiências de Young. Ao mesmo tempo passou a estudar a difração da luz. Nos meados de 1816, Fresnel publica os resultados do seu estudo, o qual foi apresentado por seu amigo Arago na Academia Francesa de Ciências, em julho do mesmo ano. Fresnel explicou matematicamente experimentos de difração da luz que realizou, usando obstáculos, objetos finos e aberturas em anteparos, combinando os aspectos do princípio da interferência de Young com o princípio de Huygens para frentes de onda em suas explicações. Para Fresnel, a amplitude das ondas de luz em uma abertura era equivalente a soma de todas ondas geradas a partir da abertura. Da mesma forma, o princípio se aplicaria para ondas de luz sendo interceptada por um obstáculo, onde a amplitude das ondas interceptadas equivaleria a interferência de todas ondas geradas pelo obstáculo (BASSALO, 1988, p. 79).

Para calcular as ondas secundárias, Fresnel engenhosamente dividiu a abertura em secções com áreas iguais. Para aberturas circulares ou pontos no eixo de simetria do sistema o cálculo das integrais de área eram fáceis, mas quando se tratava de pontos diferentes ou de formas geométricas diferentes de abertura, surgiam nas integrais de área funções trigonométricas que tornavam as integrais difíceis de se resolver (BASSALO, 1989, p. 42).

Ainda no ano 1816, Fresnel e Arago estudam dupla refração no cristal-da-Islândia, tentando interferir o raio ordinário, que seguia a lei de Snell-Descartes, com o raio extraordinários, que não obedecia. Arago escreve pra Young relatando o insucesso da experiência, e que eles observaram em ambos os raios, ordinário e extraordinário, estavam polarizados em planos perpendiculares. Em resposta à carta de Arago, Young propõe uma hipótese de que a luz seria uma onda transversal.

Laplace, Biot, Poisson e Arago, em março de 1917, escolheram a difração da luz como tema para o prêmio da Academia Francesa de Ciência de 1818. Fresnel, incentivado pelo se amigo Arago, concorre para premiação apresentando um trabalho mais elaborado da sua publicação de 1816. Durante a sua apresentação, numa das secções da Academia presidida por Laplace, Biot, Arago e Gay-Lussac, membros do comitê de julgamento do prêmio, Poisson

mostrou que matematicamente, se a teoria de Fresnel estivesse correta, deveria existir um ponto brilhante no centro, o que seria absurdo para ele. Arago, então, se manifesta propondo que na próxima seção traria a confirmação da hipótese, se fenômeno ocorria de fato ou não. Apressadamente, Arago constrói um experimento e realizando os testes descobre que aparecia o ponto brilhante de proposto por Poisson. Assim, Fresnel ganha o prêmio da Academia Francesa de Ciências de 1818 (BASSALO, 1988, p. 80; BASSALO, 1989, p. 42-43).

Nessa época Arago escreve para Fresnel perguntando se poderia conciliar os resultados da aberração estelar dentro da teoria ondulatória da luz. Agora, Fresnel se encarrega em conciliar os resultados de Arago com a teoria, onde a adição e subtração do movimento translacional da terra aparentemente não interferia na medida da refração.

Numa carta endereçada a Arago, publicada em forma de artigo em 1818, Fresnel propõe uma resposta ao problema entre a aberração estelar e o resultado de Arago:

Caso se admita que o nosso globo imprime seu movimento ao éter que o envolve, conceber-se-ia facilmente por que o mesmo prisma refrata sempre a luz, qualquer que seja o lado de onde ela chega. Mas parece impossível explicar a aberração das estrelas nessa hipótese: até agora eu só pude conceber claramente este fenômeno supondo que o éter passa livremente através do globo e que a velocidade comunicada a este fluido é somente uma pequena parte daquela da Terra; não excede o centésimo por exemplo (OLIVEIRA, 1993, p. 164; TRAILL, 2006, p. 2, tradução nossa).

Assim Fresnel propõe que, além de considerar a imobilidade do éter no espaço, uma parte desse éter era arrastado pelos corpos transparentes em movimento com a Terra. Assim, a contradição desaparece da teoria ondulatória. Esta proposição ficou conhecida por hipótese de arrastamento parcial do éter luminífero.

A partir disso, Fresnel deduz uma equação para calcular a velocidade de propagação das ondas luminosas dentro de um corpo transparente em movimento.

Partindo da ideia de que um pedaço de vidro se movendo através do éter, Fresnel presumia que fora do vidro, a densidade do éter seria  $D_0$ . Dentro do vidro a densidade era dada por  $D = n^2 D_0$ , onde  $n$  índice de refração relativo do vidro com éter. O excesso de densidade de éter dentro do vidro que se move com ele, é dada por

$$D - D_0 = (n^2 - 1)D_0. \quad (2)$$

Dessa forma, uma fração de éter ( $k$ ) que seria transportado pelo vidro, quando se desloca por ele, seria dada por

$$k = \frac{D - D_0}{D} = \frac{(n^2 - 1)D_0}{n^2 D_0} = 1 - \frac{1}{n^2}. \quad (3)$$

Este fator  $k$  foi chamado de coeficiente de arrastamento do éter (MARTINS, 2012, p. 61; OLIVEIRA, 1993, p. 166; TRAILL, 2006, p. 4-5).

Se o vidro transparente está em repouso a velocidade é  $v = \frac{c}{n}$ , onde  $c$  é a velocidade da luz e  $n$  índice de refração relativo. Se o vidro está totalmente arrastando o éter, o que não é o caso, a velocidade seria  $v = \frac{c}{n} + w$  (onde  $w$  é velocidade relativa da luz se estivesse propagando dentro do éter). Então, Fresnel conclui que a velocidade seria

$$v = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)w. \quad (4)$$

Com a equação 4, Fresnel mostrou que a refração ocorrida no prisma em movimento em relação ao éter, é igual a refração no mesmo, quando está parado para o éter, caso se a precisão estiver delimitada apenas na aproximação de primeira ordem de  $v/c$  (OLIVEIRA, 1993, p. 166). No entanto, Fresnel destacou que, mecanicamente, a equação 4 não representava o arrastamento das ondas luminosas, pois sua hipótese de baseava no arrastamento do excesso de éter nos corpos. Como a quantidade de éter existente nos corpos dependia do índice de refração, como está discutido na dedução da equação 3, isso implicaria que quantidade de éter nos corpos variaria conforme o comprimento de onda luz propagada (OLIVEIRA, 1993, p. 169). Dessa forma, haveria uma inconsistência entre a hipótese do arrastamento parcial do éter e a interpretação mecânica. Fresnel, então, faz uma advertência para desconsiderar o arrastamento do éter como substância e considera apenas o arrastamento das ondas luminosas. Apesar das críticas a equação 4, esta descrevia bem a velocidade da luz em meios transparentes em movimento.

No ano seguinte, 1819, Fresnel e Arago publicaram um trabalho sobre a transversalidade da onda luminosa, onde eles explicam que os raios ordinários e extraordinários não se interferem por vibrarem transversalmente e com direções perpendiculares entre si. Isto trouxe grandes consequências, principalmente para o meio transmissor da luz, o éter luminífero.

Até aqui o éter luminífero deveria ser gasoso, muito rarefeito, devida a alta velocidade da luz calculada por Olaf Roemer em 1675. No entanto, os gases não resistem a esforços transversais, então Fresnel reformula o éter luminífero considerando-o como sólido. Para confirmar essa afirmação, ele começa a estudar propriedades dinâmicas do éter luminífero examinados a propagação da luz em corpos cristalinos: uniaxiais e biaxiais. Assim, Fresnel consegue explicar não só a dupla refração em cristais biaxiais, mas também a dupla refração em cristais uniaxiais, usando o conceito da transversalidade da onda luminosa. Esse trabalho de dupla refração foi apresentado em novembro de 1821, outros trabalhos sobre o tema foram apresentados em 1822, sendo publicados tardiamente, em 1827 (BASSALO, 1989, p. 45-46).

Apesar de todos os avanços da ideia da transversalidade da onda luminosa, surge um novo problema com o éter sólido-elástico: o movimento dos planetas no novo éter.

### 3.3 Faraday e Maxwell

Em 1846, **Michael Faraday (1791-1867)** publica “*Sobre a magnetização da luz e a iluminação de linhas magnéticas de força*” onde declara que havia magnetizado e eletrizado o raio de luz, ou seja, usando o magnetismo e a eletricidade para rotacionar um raio polarizado. Esse experimento ele descreveu da seguinte forma:

Um raio de luz emitido de uma lâmpada Argand, foi polarizado num plano horizontal por reflexão de uma superfície de vidro, e o raio polarizado passou por um Olho de Nichol [Polarizador de Nichol] rotativo em um eixo horizontal, para ser facilmente examinado [...] Entre o espelho polarizador e a peça ocular [Polarizador de Nichol], dois poderosos pólos eletromagnéticos [dois eletroímãs] foram arranados, sendo os pólos [no formato] de um ímã da ferradura, ou [...] cilíndricos; [...]. Depois disso, qualquer substância transparente colocada entre os dois pólos, teria que passar por ele [substância transparente], tanto o raio polarizado e as linhas magnéticas de força ao mesmo tempo e na mesma direção. (FARADAY, 1846, p. 2, tradução nossa).

Continuando a descrição, Faraday comenta sobre o borossilicato de chumbo, que é um vidro resistente, e como usou este vidro no experimento que o levou a descoberta do fenômeno do “campo magnético” sobre a luz:

Um pedaço deste vidro [de borossilicato de chumbo] [...] foi colocado como um diamagnético entre os pólos [dos eletroímãs] [...] para que o raio polarizado passasse através do seu comprimento; [...]. Nestas circunstâncias, a força do eletroímã foi produzida, enviando-se uma corrente através de suas espirais, e imediatamente a imagem da chama da lâmpada tornou-se visível, e permaneceu assim enquanto o arranjo continuasse magnético. Ao parar a corrente elétrica, fazendo com que a força magnética cessasse, a luz instantaneamente desapareceu; esse fenômeno pode ser refeito à vontade, a qualquer instante de tempo, e em qualquer ocasião, mostrando uma perfeita dependência de causa e efeito. (FARADAY, 1846, p. 3, tradução nossa).

Ele conclui que o caráter da força que impressa no borossilicato seria de “rotação”, pois ao rotacionar o polaroide de Nichol para esquerda ou para direita, o feixe de luz não aparecia no anteparo, mas continuando a rotacionar o polaroide o feixe reaparecia. Marcando um dos eletroímãs como norte magnético, Faraday observou que polaroide deveria ser rotacionado no sentido horário (para direita) para que a luz reaparecesse. Se o sentido da corrente elétrica fosse alterado, o polaroide deveria ser rotacionado no sentido anti-horário, para que a luz reaparecesse, sendo que ambos os casos, o grau da luz rotacionada era o mesmo. Faraday realizou o mesmo experimento com ímãs, mas os resultados da rotação foram fracos, porém visíveis.

Para Faraday, as linhas de força magnética dos eletroímãs (ou ímãs) estariam dando “poder” ao borossilicato de chumbo de rotacionar o raio de luz, ou seja, as linhas estariam alterando as propriedades do material para que atuassem no raio polarizado. Ele observou que essas linhas, quando estavam paralelas ao raio polarizado, rotacionava o raio. Caso estivesse perpendicular, não se observava nenhum efeito. (Até o momento, não se sabia que a luz era uma onda eletromagnética e que podia ser influenciada pelas as propriedades da eletricidade e do magnetismo. No entanto, Faraday havia percebido).

Com consequência disto, Faraday propôs a seguinte lei:

[...] a lei desta ação sobre a luz é se uma linha de força magnética estiver saindo de um pólo norte, ou entrando em um pólo sul, ao longo do caminho de um raio polarizado que chega ao observador, ele irá rotacionar esse raio para a direita; ou, se tal linha de força estiver entrando em um pólo norte, ou saindo de um pólo sul, irá girar o raio para a esquerda (FARADAY, 1846, p. 4, tradução nossa).

Faraday realizou o mesmo esquema experimental para inúmeros corpos transparentes chegando a seguintes conclusões: a) para substâncias sólidas alguns apresentavam a característica de rotacionar o raio polarizado, sendo borossilicato de chumbo o melhor; b) para substâncias líquidas todos apresentaram a propriedade, sendo a água a melhor; c) para as substâncias gasosas, Faraday declara que não havia detectado o fenômeno em nenhuma dos gases que experimentou, inclusive o ar. Além disso, o tamanho do diamagnético e a intensidade das linhas de força magnética afetavam proporcionalmente a rotação do raio.

Em relação a corrente das bobinas dos eletroímãs, Faraday propôs outra lei:

A lei, portanto, pela qual uma corrente elétrica atua sobre um raio de luz é facilmente expressada. Quando uma corrente elétrica passa em volta de um raio de luz polarizada em um plano perpendicular ao raio, faz com que o raio gire em seu eixo, desde que esteja sob a influência da corrente, na mesma direção daquela, no qual a corrente está passando. (FARADAY, 1846, p. 11, tradução nossa).

Desta forma, Faraday concluiu que:

Assim se estabelece [...] uma verdade, com direta relação e dependência entre a luz e as forças magnéticas e elétricas; e assim uma grande adição feita aos fatos e considerações as quais tendem a provar que todas as forças naturais são amarradas juntas e têm uma origem comum. (FARADAY, 1846, p. 15, tradução nossa).

Observa-se, portanto, que Faraday já via indícios para uma unificação da luz com a eletricidade e o magnetismo. Prosseguindo em seu argumento, ele conclui que

A relação existente entre a luz polarizada e o magnetismo e a eletricidade, é ainda mais interessante do que se tivesse sido mostrado que existia apenas com luz comum. Não pode senão se estender à luz comum; e, como pertence à luz feita, em um certo respeito, mais preciso em seu caráter e propriedades por polarização, ele agrupa e conecta-o com esses poderes, nessa dualidade de caráter que eles possuem, produz uma abertura, que antes nos faltava, para o uso desses poderes para a investigação da

natureza desta e de outros agentes radiantes. (FARADAY, 1846, p. 15, tradução nossa).

e mais à frente ele acrescenta que “é [...] a primeira vez que a condição molecular de um corpo, necessária para produzir a polarização circular da luz, foi dada artificialmente” (FARADAY, 1846, p. 17, tradução nossa).

Nos anos de 1861 e 1862, **James Clerk Maxwell (1831-1879)** publica “*Sobre a física das linhas de força*”, estando dividida em quatro partes, onde as partes 1 e 2 foram publicadas primeiro e as partes 3 e 4 no ano seguinte. Neste artigo tetrapartido, ele formulou uma teoria mecânica dos fenômenos eletromagnéticos, com base em um mecanismo de células-vórtice conectadas por contato perfeito via partículas-rolamentos, que ele atribuiu a meio eletromagnético (“campo eletromagnético”). No entanto, Maxwell abandona este mecanismo, que é evidenciado pela sua ausência (ou menção) nos trabalhos seguintes. Deste trabalho destacamos a parte três, onde vemos a primeira hipótese de unificação do eletromagnetismo com a óptica, formulada por Maxwell.

Maxwell inicia a parte 3 do artigo, evidenciando que

Segundo nossa hipótese, o meio magnético está dividido em células, separadas por partições formadas por um estrato de partículas, as quais desempenham o papel de eletricidade. Quando as partículas elétricas são impelidas em qualquer direção, pela sua ação tangencial sobre a substância elástica das células, distorcerão cada célula, e colocar em jogo uma força igual e oposta, que surge da elasticidade das células. Quando a força é removida, as células recuperam sua forma e a eletricidade retorna à sua posição anterior. (MAXWELL, 2011, tradução nossa).

Sobre a ação (força) tangencial, Maxwell explicou que

Eu não tentei explicar essa ação tangencial, mas é necessário supor, a fim de explicar a transmissão de rotação do exterior para as partes interiores de cada célula, que a substância nas células possui elasticidade da figura, semelhante em espécie, embora diferente em grau, àquela observada em corpos sólidos. A teoria ondulatória da luz requer que admitamos este tipo de elasticidade no meio luminífero, a fim de considerar vibrações. Não precisamos nos surpreender se o meio magneto-elétrico possuir a mesma propriedade. (MAXWELL, 2011, tradução nossa).

Observa-se que Maxwell destacou a possibilidade de o meio magneto-elétrico possuir a mesma propriedade que o meio luminífero. De alguma forma, ele conseguiu visualizar uma unificação dos dois meios pelo do seu mecanismo, o que ele deixa mais claro na seguinte passagem:

Eu deduzi deste resultado [célula-vórtice] a relação entre as medidas estáticas e dinâmicas de eletricidade, e mostrei, por uma comparação dos experimentos eletromagnéticos de Kohlrausch e Weber com a velocidade da luz encontrada por M. Fizeau, que a elasticidade do meio magnético no ar é a mesma que a do meio luminífero, se esses dois meios coexistentes, coextensivos e igualmente elásticos são, não tanto, um só meio. (MAXWELL, 2011, tradução nossa).

Essa dedução que ele destaca foi feita da seguinte forma: Maxwell parte da condição de encontrar as condições de equilíbrio da esfera elástica, que está exposta às forças normal e tangencial. Partindo da condição matemática encontrada para força tangencial na superfície, ele obtém a relação entre a força eletromotriz, que atua sobre as partículas na direção  $z$ , e o deslocamento elétrico que o acompanha, causada pela distorção da esfera. A partir desta relação, ele obteve uma conexão entre coeficiente  $E$  (que depende da natureza do dielétrico) e a massa ( $m$ )

$$E^2 = m\pi, \quad (5)$$

para a substância da célula que é hipoteticamente um sólido perfeito. Depois, ele parte da energia potencial do meio (proveniente dos deslocamentos elétricos) para encontrar a força atuando entre dois corpos eletrificados. Nisso, encontra-se uma relação entre a força e o coeficiente que depende da natureza do dielétrico

$$F = -E^2 \frac{e_1 e_2}{r^2}. \quad (6)$$

Aqui, vê-se a equação de força para o campo elétrico, não plenamente em sua forma atual, mas como declara Maxwell “a força é uma repulsão variando inversamente como o quadrado da distância.” (MAXWELL, 2011).

Agora, Maxwell parte “para encontrar a taxa de propagação das vibrações transversais através do meio elástico, cujas as células são compostas, na suposição de que sua elasticidade é devida inteiramente às forças que atuam entre pares de partículas” (MAXWELL, 2011). Partindo da relação de velocidade

$$V = \sqrt{\frac{m}{\rho}}, \quad (7)$$

ele substitui a densidade  $\rho$  pela relação entre a densidade da matéria dos vórtices ( $\rho$ ) e o coeficiente de indução magnética ( $\mu$ )

$$\rho = \mu\pi, \quad (8)$$

onde ele encontra a relação do coeficiente  $E$  com a velocidade  $V$

$$E = V\sqrt{\mu}.$$

Como no ar ou no vácuo  $\mu = 1$ , assim

$$E = V.$$

Maxwell descreve que o valor da constante  $E$ , segundo Weber e Kohlrausch, é de 310.740.000.000 milímetros por segundo. E o valor da velocidade da luz no ar ( $V$ ), segundo Fizeau, é de 314.858.000.000 milímetros por segundo. Comparando esses valores pela igualdade que encontrara, Maxwell chega na conclusão de que

A velocidade das ondulações transversais em nosso meio hipotético, calculada a partir dos experimentos eletromagnéticos dos senhores Kohlrausch e Weber, concorda exatamente com a velocidade da luz calculada a partir dos experimentos ópticos do senhor Fizeau, que dificilmente podemos evitar a inferência de que a luz consiste nas ondulações transversais do mesmo meio que é a causa de fenômenos elétricos e magnéticos (MAXWELL, 2011, tradução nossa).

Em 1865, Maxwell publica “*Uma Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético*”, onde vemos a primeira formulação da teoria eletromagnética da luz, e o que seria a prévia da teoria eletromagnética publicada no “*Tratado sobre a eletricidade e o magnetismo*” em 1873. Neste artigo começa-se o processo de desmecanização da teoria eletromagnética. Ele chama de teoria dinâmica do campo por supor que no espaço em volta dos corpos (elétricos e magnéticos) existiria matéria em movimento.

Na sua discussão introdutória, Maxwell argumentou que o campo eletromagnético podia ser preenchido por qualquer tipo de matéria, e que no vácuo existiria matéria, mesmo que ínfima, transmitindo as ondulações de calor e luz, não havendo qualquer alteração em sua transmissão, quando o vácuo fosse substituído por copos transparentes. Essas ondulações seriam ondulações de uma substância etérea, que Maxwell se sentia obrigado em admitir tal fato naquele momento. E ele continua:

Temos, portanto, algumas razões para acreditar, a partir dos fenômenos da luz e do calor, que há um meio etéreo preenchendo todo o espaço e permeando os corpos, que é capaz de ser colocado em movimento e de transmitir o movimento de uma parte a outra, e de comunicar este efeito à matéria bruta de forma a aquecê-la e atingi-la de várias maneiras. (MAXWELL, 1865, p. 460, tradução nossa).

Mais à frente, Maxwell complementa que deveria aceitar “a existência de um meio penetrante, de densidade pequena, mas real, capaz de ser colocado em movimento, e de transmitir movimento de uma parte a outra, com velocidade grande, mas não infinita” (MAXWELL, 1865, p. 460, tradução nossa). Além disso “o meio é [...] capaz de receber e armazenar dois tipos de energia, a energia ‘atual’, que depende do movimento de suas partes, e energia ‘potencial’, que consiste do trabalho a ser efetuado pelo meio, na recuperação dos deslocamentos associados à sua elasticidade” onde “a propagação das ondulações consiste em uma transformação contínua de uma dessas formas de energia na outra, alternadamente” (MAXWELL, 1865, p. 461, tradução nossa). Maxwell utiliza-se do conceito de energia como consequência da adoção da mecânica lagrangeana, para explicar a propagação de tais ondas em sua teoria dinâmica de campo.

Além disso, Maxwell destacou que o meio luminífero sofre a ação do magnetismo pela descoberta de Faraday, onde raios de polarização plana é rotacionado na direção linha de força magnética. Esta rotação foi observada em meios com densidade considerável, não sendo

alteradas as propriedades do campo magnético quando se altera os meios. Assim ele supôs que o meio denso modifica apenas o movimento do éter.

Mais à frente, Maxwell conclui que

Parece, portanto, que certos fenômenos da eletricidade e do magnetismo levam à mesma conclusão que [os fenômenos] da óptica, isto é, que há um meio etéreo que permeia todos os corpos, e que é modificado em pequeno grau pela presença dos mesmos; que as partes deste meio podem ser colocadas em movimento por correntes elétricas e por ímãs; que este movimento é transmitido de uma parte a outra do meio através de forças que surgem nas interligações de suas partes; sob a ação destas forças há uma certa “entrega” que depende da elasticidade destas conexões; e portanto a energia pode existir de duas formas no meio, sendo uma forma a da energia real de movimento de suas partes, e a outra, a de energia potencial armazenada nas conexões, em virtude de sua elasticidade. (MAXWELL, 1865, p. 464, tradução nossa).

Na parte 6 do artigo, Maxwell retoma a essa hipótese óptica (um meio elástico por onde as vibrações da luz são propagadas), para demonstrar que, no mesmo meio, a ocorrência de outros fenômenos como da luz. Assim, o objetivo de Maxwell era mostrar, pelas propriedades do campo eletromagnético e deduzido dos seus fenômenos, que são suficientes para explicar a propagação da luz, da mesma forma que se explica usando o meio etéreo.

Admitindo que uma onda plana se propagando através campo com uma velocidade  $V$ , com a sua direção magnética situada no plano da onda. Maxwell realiza os cálculos matemático desta situação, e encontra a equação da onda eletromagnética, da qual se obtém a velocidade que a onda plana se propaga

$$V = \sqrt{\frac{k}{4\pi\mu}}. \quad (9)$$

Ele conclui que:

Essa onda consiste inteiramente de distúrbios magnéticos, estando a direção da magnetização no plano da onda. Nenhum distúrbio magnético cuja direção de magnetização não esteja no plano da onda pode ser propagado como uma onda plana.

Assim, os distúrbios magnéticos propagados pelo campo eletromagnético concordam com a luz, que a perturbação em qualquer ponto é transversal à direção da propagação, e tais ondas podem ter todas as propriedades da luz polarizada. (MAXWELL, 1865, p. 499, tradução nossa).

Quanto à velocidade da luz ele discute que “O único meio em que experiências foram feitas para determinar o valor de  $k$  [(coeficiente da eletricidade elástica no meio onde o experimento foi feito)] é ar, em que  $\mu = 1$  e, portanto, pela equação [ $k = 4\pi v^2$ ],  $V = v$ ” (MAXWELL, 1865, p. 499, tradução nossa).

Maxwell volta a destacar que a velocidade  $v$  ( $v$  minúsculo) é 310.740.000 metros por segundo nos experimentos magnéticos de Weber e Kohlrausch. Para a velocidade da luz no ar  $V$  ( $V$  maiúsculo), segundo Fizeau, é 314.858.000 metros por segundo, e já nas medidas acuradas

de Foucault  $V$  é 298.000.000 metros por segundo. E para velocidade da luz no espaço ao redor da terra  $V$  é 308.000.000 metros por segundo. Assim ele conclui que “a concordância dos resultados parece mostrar que a luz e o magnetismo são afetos da mesma substância, e que a luz é um distúrbio eletromagnético propagado pelo campo de acordo com as leis eletromagnéticas” (MAXWELL, 1865, p. 499, tradução nossa).

Mais à frente Maxwell, esclarece mais esse fato:

As equações do campo eletromagnético, deduzidas de evidências puramente experimentais, mostram que só podem ser propagadas as vibrações transversais. [...].

Assim, a ciência eletromagnética leva exatamente às mesmas conclusões que a ciência óptica com respeito à direção das perturbações que podem ser propagadas pelo campo; tanto afirmar a propagação de vibrações transversais, e ambos dão a mesma velocidade de propagação. Por outro lado, ambas as ciências estão perdidas quando chamadas a afirmar ou negar a existência de vibrações normais (MAXWELL, 1865, p. 500-501, tradução nossa).

Como ele afirma na discussão introdutória do artigo:

[...] as equações gerais serão aplicadas ao caso de uma perturbação magnética que se propaga através de um campo não condutor, e mostra-se que as únicas perturbações que podem se propagar desta forma são as perturbações transversais à direção de propagação, e que a velocidade de propagação é a velocidade  $v$  encontrada nos experimentos como os de Weber, [...].

Essa velocidade é tão próxima da velocidade da luz que parece que temos razão suficientemente forte para concluir que a própria luz (incluindo o calor radiante, e qualquer outra radiação que exista) é uma perturbação eletromagnética na forma de ondas que se propagam no campo eletromagnético, de acordo com as leis eletromagnéticas. [...]. (MAXWELL, 1865, p. 465-466, tradução nossa).

Quando conclui sua teoria do campo eletromagnético, Maxwell notou que em seus resultados, as ondas de luz moviam-se com uma velocidade constante, nem aumenta nem diminui, independentemente do estado de emissão (no solo ou em movimento). Isto o pasmou de tal forma, que pensou que as suas equações estariam erradas ou que só eram válidas para um sistema em repouso em relação ao éter. Mas isto se tornará um problema que será resolvido mais à frente, trazendo uma mudança brusca de paradigma (ROTHMAN, 2005, p. 105).

Maxwell, em 1873, publica o trabalho “*Sobre a ação a distância*” onde discursou sobre como os corpos agem uns sobre os outros, nos pontos de vista: ação por contato e ação a distância. Sobre o éter, Maxwell trouxe uma sugestão em favor da ação a distância, ao mesmo tempo que faz sua crítica ao meio etéreo:

Quanto àqueles que introduzem o éter, outros meios quaisquer para explicar estas ações sem qualquer evidência direta da existência de tais meios, ou qualquer entendimento claro da maneira pela qual estes meios realizam seu trabalho, e que preenchem o espaço três ou quatro vezes com éteres de diferentes tipos, quanto menos falarem sobre seus escrúpulos filosóficos em admitir a ação a distância, melhor será (TORT, CUNHA e ASSIS, 2004, p. 276).

Observa-se que Maxwell via que a mecanicidade do éter estava trazendo mais problemas, principalmente com as faltas de evidência da existência do meio etéreo, deixando sem opção para explicar os fenômenos eletromagnéticos e ópticos. A ação a distância, segundo ele, seria mais “palpável”, simples e fácil de explicar todos os fenômenos existente naquele momento.

No final do trabalho, Maxwell traz notoriedade alguns fatos sobre a luz que destacaremos a seguir. Primeiramente, ele ressaltou a importância que das linhas de força de Faraday. Depois ele destacou que: “[...] uma das descobertas mais frutíferas de Faraday, a rotação magnética da luz, permite-nos dar um passo mais adiante” (TORT, CUNHA e ASSIS, 2004, p. 280), fato que deu a Maxwell a seguinte conclusão:

Vimos, portanto, que há diversos tipos de trabalho a serem realizados pelo meio eletromagnético, se este meio existir. Vimos também que o magnetismo tem uma relação íntima com a luz, e sabemos que existe uma teoria da luz que supõe que esta consiste em vibrações de um meio. Qual é a relação deste meio luminífero com o meio eletromagnético? (TORT, CUNHA e ASSIS, 2004, p. 281).

Para responder à pergunta, Maxwell comparou as velocidades da luz com a velocidade das perturbações magnéticas, como havia demonstrado inicialmente em 1862 e consistentemente em 1865. Com isto, Maxwell conclui nesse artigo que “[...] as diferentes determinações de quaisquer destas velocidades diferem entre si não mais que a velocidade estimada de propagação da luz difere da velocidade estimada de propagação das pequenas perturbações eletromagnéticas.” (TORT, CUNHA e ASSIS, 2004, p. 281), ou seja, para ele, ambas velocidades são semelhantes.

O mais surpreendente disso destaca-se agora:

Mas se os meios luminífero e eletromagnético ocupam o mesmo lugar e transmitem perturbações com a mesma velocidade, que razão temos nós de distinguir um meio do outro? Considerando-os como sendo o mesmo meio, pelo menos evitamos a acusação de estarmos preenchendo o espaço duas vezes com diferentes tipos de éter. (TORT, CUNHA e ASSIS, 2004, p. 281).

e continuando

Além disso, o único tipo de perturbação eletromagnética que pode propagar-se em um meio não condutor é uma perturbação transversal à direção de propagação, o que está de acordo com o que sabemos sobre a perturbação de chamamos luz. Portanto, até onde sabemos, a luz pode também ser uma perturbação eletromagnética em um meio não condutor. (TORT, CUNHA e ASSIS, 2004, p. 281).

E com isso, ele apontou a consequência da sua hipótese:

Se admitirmos isso, a teoria eletromagnética da luz, acrescida da teoria de Cavendish e Coulomb, estará em acordo em todos os aspectos, por meio do ponto chave das ciências combinadas da luz e da eletricidade - a grande descoberta de Faraday da

rotação eletromagnética da luz - com a teoria ondulatória, e o trabalho de Thomas Young e o de Fresnel ficará estabelecido sobre bases mais firmes do que nunca (TORT, CUNHA e ASSIS, 2004, p. 281).

Maxwell ressaltou ainda as consequências trazida nesse meio “lumino-eletromagnético”, dizendo que

Deveremos encontrá-las [as vastas regiões interplanetárias e interestelares] já preenchidas com este meio maravilhoso, tão pleno [...]. Ele se estende ininterrupto de estrela a estrela, e quando uma molécula de Hidrogênio vibra em uma estrela [...], o meio recebe os impulsos destas vibrações, e depois de transportá-los em seu imenso regaço [...], entrega-os no devido tempo, de maneira regular, ao espectroscópio [...] (TORT, CUNHA e ASSIS, 2004, p. 281).

Além disso, Maxwell evidencia que no meio “as suas diminutas partes podem ter movimento rotatório” além do movimento de vibração, sendo esse movimento rotatório gerador das linhas de força magnética. Para ele, essas linhas não deveriam ser consideradas como abstrações matemáticas, pois indicam as direções que o meio está exercendo tensão. Maxwell destaca também que o meio lumino-eletromagnético agiria como uma mola, sendo que o estiramento (ou compressão) resultaria em uma tensão atraindo os corpos eletricamente opostos. Essas propriedades, segundo ele, seria “daquilo que muitas das vezes tem sido chamado de vácuo, ou nada” que “permitem-nos decompor diversos tipos de ação a distância em ações entre partes contíguas de uma substância contígua” (TORT, CUNHA e ASSIS, 2004, p. 282).

Em 1878, um ano antes de sua morte, Maxwell publica um verbete sobre o éter na *Encyclopaedia Britannica*, onde ele analisou novos métodos para determinar a velocidade da terra pelo o éter. Maxwell sugeriu que se fizesse a medição do tempo que a luz demoraria para ir e voltar entre dois pontos, considerando o movimento paralelo ou perpendicular à velocidade da terra. Sugeriu também a velocidade no éter poderia ser obtida pelo estudo dos eclipses dos satélites de Júpiter (MARTINS, 2012, p. 68).

Por volta de 1850, Armand-Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) e Jean-Bernard-Leon Foucault (1819-1868) mediram a velocidade da luz com um por cento de erro. Além disso, Foucault, no mesmo ano, demonstrou que a velocidade da luz na água era inferior à velocidade da luz no ar (MARTINS, 2012, p. 63). Esses resultados tiveram consequências: Primeiro, o resultado favorecia a teoria ondulatória da luz, pois a geometria do raio de luz, ao passar de um meio para outro, só poderia ser explicada se a luz tivesse uma velocidade menor nos meios de maior densidade (ao contrário da teoria corpuscular da luz: velocidade maior nos meios de maior densidade); segundo, a enorme velocidade da luz no vácuo exigia uma grande rigidez elástica do éter, e terceiro, como explicar a diferença de velocidade da luz no vácuo e na água,

se a água era perfeitamente permeável ao éter e à luz. Com esse dilema iniciou-se a corrida para o aperfeiçoamento das técnicas para medir a velocidade da luz. Além disso, o éter permanecia sem uma confirmação experimental de sua existência (MASINI, 2000).

Fizeau se dedicou a procurar outros experimentos que pudessem medir os efeitos da velocidade da Terra no éter, já que parecia existir e tinha o comportamento previsto pela teoria de Fresnel. Outros pesquisadores da época procuraram detectar o movimento da Terra pelo éter, através de outros métodos, pois a teoria de Fresnel previa uma parte dos fenômenos (refração, difração e a aberração estelar), o que levaria a um possível resultado nulo, como consequência. Desta forma, foram procurados outros tipos de fenômenos. Em 1862, Jacques Babinet (1794-1872) propôs que o desvio da luz em uma rede de difração pudesse mostrar o movimento da terra (MARTINS, 2012, p. 65). Por consequência, uma série de experimentos foram realizados durante esta época. Muitos traziam resultados positivos, fazendo com que acreditassem na teoria do éter de Fresnel.

No entanto, uma análise teórica mais completa da velocidade da terra em relação ao éter foi realizada no início da década de 1870. Eleuthère Elie Nicolas Mascart (1837-1908), em 1872 e 1874, publicou trabalhos que mostraram que os experimentos, refeitos por ele até a sua época, davam resultados nulos, chegando à conclusão de que:

[...] o movimento de translação da Terra não tem nenhuma influência apreciável sobre os fenômenos de óptica produzidos com uma fonte terrestre ou com a luz solar, que esses fenômenos não nos dão um meio de apreciar o movimento absoluto de um corpo e que os movimentos relativos são os únicos que podemos atingir (MASCART, 1874 apud MARTINS, 2012, tradução autor).

Parece que Mascart estabeleceu experimentalmente o princípio da relatividade óptica, justificando tanto teoricamente quanto por experimento, os resultados pela teoria de Fresnel. No entanto, o princípio da relatividade aplicado na óptica ondulatória (o que é surpreendente!) impossibilitaria detecção de um movimento relativo da Terra em relação ao éter (MARTINS, 2012, p. 67-68). Caso essa ideia tivesse sido levada a sério, anteciparia a dor de cabeça “relativístico” e complicaria ainda mais a física do éter.

Já em 1880, a existência do éter já era admitida e com o aperfeiçoamento das técnicas de medição da velocidade da luz, passaram a aplicá-las na mensura do arrasto da terra em relação ao éter. **Albert Abraham Michelson (1852-1931)**, inspirado na ideia de Maxwell e de Fizeau, montou um experimento baseado no fenômeno da interferência. O experimento consistia em dividir um feixe de luz através de um espelho semitransparente, onde os raios percorriam sentidos diferentes e qualquer alteração das velocidades dos raios de luz poderia ser observado pelo padrão de interferência. Pelo o interferômetro, como foi denominado o

experimento, podia-se analisar velocidades diferentes: no mesmo sentido do movimento da Terra ou o sentido contrário e o sentido perpendicular ao movimento da Terra.

Em 1881, Michelson realizou as suas primeiras observações do interferômetro, os resultados não foram muito bons, então ele contata **Edward Williams Morley (1838-1923)** para ajudá-lo na construção e no aprimoramento das técnicas e para realizar o experimento com mais precisão. Em 1887, Michelson e Morley realizam novamente as observações experimentais e os resultados foram nulos, indicando que não havia variação na velocidade da luz em qualquer direção relativa ao movimento translacional da Terra. O experimento foi refeito várias vezes, dando sempre o mesmo resultado.

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) havia duvidado dos resultados de 1881 de Michelson, mas se convenceu com os resultados de 1887. Em 1892, Lorentz publica o relatório dos resultados da experiência de Michelson-Morley, e no mesmo relatório introduz a “contração de Lorentz”, que descreve a contração dos objetos à medida que se movimentam, para explicar os resultados nulos do experimento e salvar o éter (ROTHMAN, 2005, p. 104).

Já em 1887, **Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)** descobre o efeito fotoelétrico como consequência de sua descoberta das ondas eletromagnéticas. Hertz observou que centelhas de uma bobina de alta tensão entre os terminais (circuito emissor) produziam centelha entre as pontas em um circuito desconectado (circuito receptor). Confirmando que essas novas perturbações possuíam uma velocidade finita, e que sofriam reflexão, difração e interferência como as ondas de luz. O que mais tarde ficou conhecido como ondas de rádio (ROTHMAN, 2005, p. 86). Hertz observou que, ao escurecer a sala para observar a fraca centelha do segundo circuito, o efeito enfraquecia e afastando ambos os circuitos, a centelha no segundo circuito desaparecia. Mas iluminando as pontas com uma lâmpada de arco voltaico, as centelhas reapareciam. Depois de algum tempo realizando experiências com o fenômeno, Hertz observou que a luz ultravioleta produz centelhas mais intensas (ROTHMAN, 2005, p. 87). Este fenômeno se tornou um dos grandes mistérios da física no final do século XIX e todas as tentativas de entender o fenômeno pelas as teorias modernas da luz, não tiveram bom êxito, ficando para o século XX a solução do problema.

Quanto ao éter, Hertz declara que “Tire a eletricidade do mundo e a luz desaparece. Tire o éter luminífero do mundo e as forças elétricas e magnéticas não podem mais cruzar o espaço” (ROTHMAN, 2005, p. 88). Por volta de 1880, alguns resultados falsos fizeram Hertz crer que os raios catódicos eram ondas etéreas sem carga, alterando suas concepções sobre o tema.

Com a morte de prematura de Hertz, seu auxiliar, Philip Eduard Anton von Lenard (1862-1947) continuou os estudos experimentais de incidência de luz ultravioleta, e percebeu

que o ultravioleta arrancava cargas elétricas (não o elétron ainda) da placa incidida. E concluiu que:

- a) as cargas elétricas possuem velocidades iniciais finitas, mesmo em um campo nulo e que não dependa da temperatura;
- b) a intensidade da luz é influenciada pela frequência, não alterando a velocidade das cargas;
- c) o efeito só é observado a partir de uma determinada frequência;
- d) o número de cargas emitidas depende da intensidade da luz.

Com essas características o fenômeno não poderia ser explicado pela teoria ondulatória da luz, tratando-se da frequência da luz e a velocidades das cargas.

### 3.4 Radiação do corpo negro

Algumas questões ficaram sem resposta, dentre elas: como ocorre a transmissão de luz e calor do sol até a terra e porque corpos de diferentes materiais, quando aquecido, apresentam o mesmo padrão de luminosidade.

As primeiras explicações surgem com Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) em 1860, com a publicação de “*Sobre a relação entre os poderes de irradiação e absorção de diferentes corpos para luz e calor*”. Kirchhoff provou que para raios de mesmos comprimentos de onda e com temperaturas iguais teria a mesma razão entre a potência emissiva e a absorvidade para todos os tipos de corpos. Ainda no mesmo artigo Kirchhoff introduz a noção de corpo negro:

A prova que estou prestes a dar da lei acima mencionada, repousa na suposição de que corpos podem ser imaginados, os quais, por infinitas espessuras, absorvem completamente todos os raios incidentes, nem refletem e nem transmitem algum. Chamarei esses corpos *perfeitamente pretos* ou, mais brevemente, corpos *negros*. Isto é necessário, em primeiro lugar, para investigar o poder irradiante dos corpos desta descrição. (KIRCHHOFF, 1860, p. 2, tradução nossa).

Para ele, seria um corpo perfeitamente negro, aquele que absorve toda a radiação que nele incide e mostrou que a potência emissiva depende apenas da temperatura e da frequência da radiação (STUDART, 2000a, p. 525).

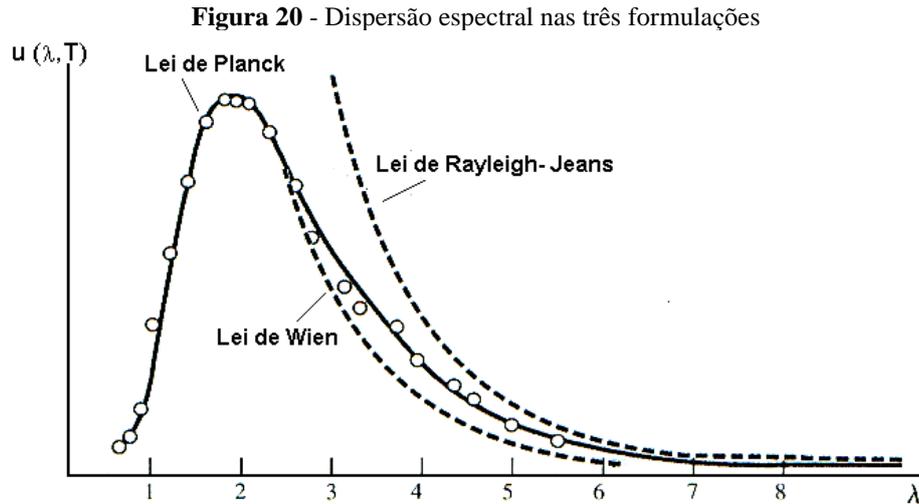
Em 1879, Josef Stefan (1835-1893) percebeu que a energia total da emissão da radiação era proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, com base nos resultados experimentais de 1864, de John Tyndall (1820-1893), que observou a emissão de radiação total de um fio de platina era 11,7 vezes maior a 1200°C do que a 525°C. Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) também demonstrou que a densidade de energia deveria ser proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, apenas presumindo a existência de uma pressão de radiação

(obtida pela teoria eletromagnética de Maxwell) e tratando a radiação como uma máquina térmica, o que embasou teoricamente o trabalho de Stefan e confirmou os seus resultados (Lei de Stefan-Boltzmann) (STUDART, 2000a, p. 525).

Em 1893, Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928) estabeleceu uma relação de distribuição espectral de densidade de energia entre a composição espectral (frequência) e a temperatura; que foi chamada de lei de deslocamento, pois o comprimento de onda, onde a intensidade de radiação é máxima, varia apenas com a temperatura (Lei de Wien).

Já em junho de 1900, John William Strutt {Lorde Rayleigh} (1842-1919) pública uma curta nota descrevendo a aplicação do teorema da equipartição da energia (Princípio da equipartição de energia de Maxwell-Boltzmann) para oscilações eletromagnéticas, que poderia se formar no interior da cavidade resultante da radiação. Para isso, Lorde Rayleigh introduziu a ideia de osciladores para calcular o número de ondas estacionárias com frequências permitidas dentro da cavidade, e a partir disso, encontrou uma equação de distribuição espectral que relaciona a frequência e a temperatura. Em 1905, Rayleigh publicou um artigo com cálculo de todos os fatores numéricos da equação da nota de 1900. Na leitura desse artigo James Hopwood Jeans (1877-1946) observou o que fator de  $\frac{1}{8}$  havia sido esquecido por Rayleigh, comunicando-o sobre isto. O esquecimento deste fator causou modificações na equação que encontrara (Equação de Rayleigh-Jeans) (STUDART, 2000a, p. 529).

Surgia então um problema: como descrever matematicamente de forma precisa e bem fundamentada a distribuição espectral, visto que a distribuição espectral de Wien descrevia a radiação de corpo negro para comprimentos de ondas menores, e distribuição espectral de Rayleigh-Jeans descrevia a radiação de corpo negro para comprimentos de ondas maiores; sendo que ambas não descreviam plenamente distribuição espectral obtida experimentalmente (ver figura 20). Este problema ficaria para uma terceira personagem resolver: Max Planck.



Fonte: Laboratório Virtual<sup>28</sup>.

### 3.5 Planck e Einstein

Em 1897, **Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947)** inicia seus estudos sobre o problema da radiação do corpo negro. Ele procurava uma abordagem baseada na eletrodinâmica e da irreversibilidade do processo para explicar como a radiação se conduzia para o equilíbrio térmico. Como modelo simples para a matéria, Planck escolheu osciladores harmônicos por causa do teorema de Kirchhoff que assegurava a independência da distribuição da radiação do corpo negro quanto a composição da matéria.

Em 7 de outubro de 1900, Planck foi informado por Heinrich Rubens (1865-1922) (um dos integrantes das duas equipes que, independentemente, mediram a radiação numa região inexplorada de grandes comprimentos de onda) que para comprimentos de onda longos (ou de baixa frequência) a densidade espectral era proporcional a temperatura e que, para baixas temperaturas, os dados obtidos correspondiam a equação de Rayleigh. Neste dia Planck deduziu a sua equação de distribuição espectral, informando a Rubens sobre o resultado ainda no mesmo dia (STUDART, 2000a, p. 528 e 530).

Já 19 de outubro do mesmo ano, Planck apresenta “*Sobre um aperfeiçoamento da Equação de Wien para espectro*” onde mostra a sua equação de distribuição espectral da radiação de corpo negro, que obteve a partir da análise dos resultados previstos para densidade de radiação nos limites extremos da frequência. Planck expressa que

[...] finalmente comecei a construir expressões completamente arbitrárias para entropia que, embora mais complicadas do que a expressão de Wien, ainda parecem

<sup>28</sup> Disponível em: <http://www.ensinoa distancia.pro.br/ead/qg/aula-3/aula-3.html>. Acesso em: 8 jun. 2018.

satisfazer completamente todos os requisitos da termodinâmica e da teoria eletromagnética.

Fui especialmente atraído por uma das expressões, então construídas, que é quase tão simples quanto a expressão de Wien, e que mereceria ser investigada uma vez que a expressão de Wien não é suficiente para cobrir todas as observações. (STUDART, 2000b, p. 536, tradução autor).

E Planck concluiu dizendo que “assim, permiti-me chamar a sua atenção para esta nova fórmula, que considero ser, exceto a expressão de Wien, a mais simples possível do ponto de vista da teoria eletromagnética da radiação” (STUDART, 2000b, p. 537, tradução autor).

Na sessão de 14 de dezembro de 1900, na qual Planck apresenta “*Sobre a Lei de Distribuição de Energia no Espectro Normal*”, ele demonstrou a dedução teórica da equação proposta em 19 de outubro. Planck introduz a ideia de descontinuidade da energia dos osciladores.

Já em janeiro de 1901, Planck publica uma análise mais completa dos dois trabalhos do ano anterior, apresentando uma dedução mais aprimorada da expressão que encontrou da distribuição espectral. Pode-se destacar nesta publicação, que equação da entropia de Boltzmann foi escrita na forma que conhecemos por Planck, e ainda introduziu a constante de Boltzmann. Já no final de sua vida, Planck comenta que nunca havia atribuído algum significado físico à constante de Boltzmann, por mais que fosse conhecida como a “constante de Boltzmann”, e que nunca procurou estimar o seu valor numérico (STUDART, 2000a, p. 530, nota 23).

No entanto, o conceito de *descontinuidade quântica* surgiu nos trabalhos de Einstein, Lorentz e Ehrenfest, entre os anos de 1905 a 1908, pois se olharmos nas publicações de Planck nos anos 1906/1907, sobre a radiação de calor, não encontraremos a expressão  $u = nhv$  ou alguma referência a descontinuidade; a única discretização observada só aparece nos cálculos de probabilidade de uma distribuição de energia, como havia feito em 1900.

Planck foi persuadido por seus contemporâneos a aceitar a ideia de restrição de energia dos ressonadores a valores discretos, o que não foi fácil para ele. Só em 1908, em uma carta a Lorentz, Planck expõe que

[A excitação dos ressonadores] não corresponde à simples conhecida lei do pêndulo; ao contrário, existe um certo limiar; o ressonador não responde a todas excitações muito pequenas; e se responde as maiores, o faz apenas de modo que sua energia seja um múltiplo inteiro do elemento de energia  $h\nu$ , tal que o valor instantâneo da energia é sempre representado por um tal múltiplo inteiro.

Em suma, eu poderia, portanto, dizer que faço duas suposições:

- A energia do ressonador em um dado instante é  $gh\nu$  ( $g$  um número inteiro ou 0);
- A energia emitida e absorvida por um ressonador durante um intervalo [de tempo] contendo bilhões de oscilações (e, portanto, também a energia média de um

ressonador [(oscilador)] é a mesma que seria se a equação usual do pêndulo fosse aplicada. (STUDART, 2000a, p. 532; KUHN, 1984, p. 238, tradução nossa).

ou seja, aqui ele se refere a quantização da energia e a descontinuidade quântica.

Foi apenas em 1905, com a publicação do primeiro artigo de Einstein, que introduziu a hipótese dos quanta de luz, que o conceito de Planck foi sendo reconhecido.

Em 1905, **Albert Einstein (1879-1955)** publica cinco artigos dos quais, o primeiro e o quarto, se destacaram pelas suas contribuições revolucionárias, favorecendo o surgimento de duas novas físicas e abalando os pilares da física existente na sua época.

O primeiro artigo “*Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*”, Einstein destacou que “de acordo com a teoria de Maxwell, a energia é considerada uma função espacial contínua para todos os fenômenos puramente eletromagnéticos, e [...] também para a luz” e que “a energia de um raio de luz, emitido de uma fonte puntiforme, espalha-se continuamente sobre um volume sempre crescente.” (TORT, 2001, p. 201), desta forma “a teoria ondulatória da luz, que opera com funções parciais contínuas, provou-se sobremaneira adequada na descrição de fenômenos puramente ópticos, e provavelmente nunca será substituída por outra teoria” e “que a teoria da luz, operando com funções contínuas, leve a contradições quando aplicadas aos fenômenos a emissão e transformação da luz” (TORT, 2001, p. 201-202).

Ver-se que Einstein, de alguma forma, percebia que os fenômenos de emissão e transformação da luz (radiação do corpo negro, fotoluminescência, raios catódicos) não poderiam ser explicados pela teoria ondulatória, mesmo que os demais fenômenos da luz (refração, reflexão, difração, polarização, interferência), embasados na teoria e nos experimentos, pudessem indicar tal possibilidade. E por causa disto, ele propõe que as observações de tais fenômenos “podem ser mais facilmente entendidas se admitirmos que a energia da luz é distribuída de forma descontínua no espaço.” (TORT, 2001, p. 202).

Assim,

De acordo com a hipótese aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte puntiforme, a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia, localizados em pontos do espaço que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais. (TORT, 2001, p. 202).

Para justificar o fato, Einstein apresenta argumentos que comprovam a sua ideia. Primeiramente ele parte da suposição que um gás, encapsulado em reservatório e com paredes refletoras (da mesma forma que uma garrafa de café), possui elétrons ligados (nos átomos do

gás) que absorvem e emitem onda eletromagnéticas de períodos definidos. Einstein chamou esses elétrons ligados de ressonadores.

Depois, ele encontra uma relação entre a variação de entropia e a densidade de radiação baixa para a radiação monocromática, onde destaca que “varia com o volume da mesma maneira que a entropia de um gás ideal ou uma solução diluída.” (EINSTEIN, 1965, p. 8, tradução nossa):

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta v} \ln \left( \frac{v}{v_0} \right). \quad (10)$$

onde  $S$  é a entropia final;  $S_0$  é a entropia inicial;  $E$  é a energia do sistema;  $\beta$  é uma constante de proporcionalidade;  $v$  é a frequência da radiação;  $v$  é o volume inicial e  $v_0$  é o volume final.

Com essa relação, Einstein faz uma interpretação ao princípio de Boltzmann. Sabendo-se que a entropia seria uma transição de um estado para outro estado de maior probabilidade, ele demonstra que a variação entre a entropia inicial  $S_0$  e a entropia final  $S$  é equivalente a probabilidade relativa ( $W$ ) de um estado de entropia final ( $S$ ):

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln(W), \quad (11)$$

e que a probabilidade relativa ( $W$ ) implica em “quão grande é a probabilidade de que, num instante de tempo escolhido aleatoriamente, todos os pontos móveis  $n$  no volume especificado  $v_0$  podem ser encontrados por acaso no volume  $v$  [...]” (EINSTEIN, 1965, p. 10, tradução nossa).

A probabilidade relativa  $W$  de “um número ( $n$ ) de pontos móveis (por exemplo, moléculas) confinado em um volume  $v_0$ ” (EINSTEIN, 1965, p. 9, tradução nossa), em pequena quantidade, que podem transferir-se do volume  $v_0$  para um volume  $v$ , sem alteração nas outras configurações do sistema e desconsiderando as interações entre si, é dado por:

$$W = \left( \frac{v}{v_0} \right)^n. \quad (12)$$

Assim, substituindo a equação 12 na equação 11, tem-se

$$S - S_0 = \frac{Rn}{N} \ln \left( \frac{v}{v_0} \right). \quad (13)$$

Igualando a equação 10 com a equação 13, Einstein obteve

$$\frac{E}{\beta v} \ln \left( \frac{v}{v_0} \right) = \frac{Rn}{N} \ln \left( \frac{v}{v_0} \right) \rightarrow n = \frac{R}{N} \frac{E}{\beta v}. \quad (14)$$

Desta forma, ele conclui que “Se a radiação monocromática de frequência  $v$  e a energia  $E$  estiverem envolvidas por paredes refletoras em um volume  $v_0$ , a probabilidade de que a

energia total de radiação seja encontrada em um volume  $v$  (partindo do volume  $v_0$ ) a qualquer instante escolhido aleatoriamente é” (EINSTEIN, 1965, p. 11, tradução nossa):

$$W = \left( \frac{v}{v_0} \right)^{\frac{R E}{N \beta v}}, \quad (15)$$

e que a “[...] Radiação monocromática de baixa densidade (dentro da faixa de validade da fórmula de radiação de Wien) comporta-se termodinamicamente como se consistisse de um número de quanta de energia independente de magnitude  $R\beta v/N$ .” (EINSTEIN, 1965, p. 11, tradução nossa).

Assim, Einstein afirma que

Se a entropia da radiação monocromática depende do volume como se a radiação fosse um meio descontínuo, consistindo de quanta de energia de magnitude  $R\beta v/N$ , o próximo passo óbvio é investigar se as leis de emissão e transformação da luz são também de tal natureza que podem ser interpretadas ou explicadas considerando-se que a luz consiste em tais quanta de energia. (EINSTEIN, 1965, p. 11, tradução nossa).

Para o efeito fotoelétrico, ou emissão de raios catódicos por meio da iluminação de corpos sólidos, ele destaca que

A concepção usual de que a energia da luz é continuamente distribuída pelo espaço através do qual ela se propaga, encontra dificuldades muito sérias quando se tenta explicar o fenômeno fotoelétrico, como foi apontado no artigo pioneiro do senhor Lenard.

De acordo com o conceito de que a luz incidente consiste em quanta de energia de magnitude  $R\beta v/N$ , sempre, pode-se conceber a ejeção de elétrons pela luz da seguinte maneira. Os quantas de energia penetram na camada superficial do corpo, sua energia é transformada, pelo menos em parte, em energia cinética nos elétrons: vamos supor que isso é o que acontece. A possibilidade não deve ser excluída, no entanto, que os elétrons podem receber sua energia apenas em parte do quantum de luz.

Um elétron ao qual a energia cinética foi transmitida no interior do corpo terá perdido esta energia no momento em que atinge a superfície. Além disso, vamos supor que ao deixar o corpo cada. O elétron deve realizar uma quantidade de trabalho  $P$  característica da substância. Os elétrons ejetados saindo o corpo com a maior velocidade normal será aquele que estava diretamente na superfície. (EINSTEIN, 1965, p. 13, tradução nossa).

Desta forma, a energia cinética necessária para que um elétron saia da superfície, segundo Einstein, é dada por

$$E_K = \frac{R\beta v}{N} - P. \quad (16)$$

Assim, Einstein conclui que

Até onde posso ver, não há contradição entre essas concepções e as propriedades da foto elétrica observada pelo senhor Lenard. Se cada quantum de energia da luz incidente, independentemente de tudo mais, fornece sua energia de elétrons, então a distribuição de velocidade dos elétrons ejetados será independente. Densidade da

intensidade da luz incidente; por outro lado, o número de elétrons saindo do corpo se outras condições forem mantidas constantes, seja proporcional à intensidade da luz incidente. (EINSTEIN, 1965, p. 14, tradução nossa).

No entanto, nesse artigo, Einstein não mostra que a magnitude  $R\beta/N$  seria equivalente a constante de Planck

$$h = \frac{R\beta}{N}, \quad (17)$$

mas com o tempo foi demonstrada tal relação.

Da equação 15, tem-se que a energia é dada por

$$E = n \frac{R\beta}{N} \nu \rightarrow E_n = nh\nu, \quad (18)$$

ou seja, tanto os ‘quantas de energia de Planck’ quanto a ‘energia dos quantas de Einstein’, podem ser calculados pela relação

$$E = h\nu. \quad (19)$$

Apesar da semelhança dos quantas de Einstein e de Planck e da igualdade das constantes, no contexto exposto, a física de ambas propostas é totalmente diferente, não havendo uma implicação de uma com a outra. A definição da quantização da energia foi posteriormente chamada de fótons por sugestão de Gilbert Newton Lewis (1875-1946), em 1926.

Já no quarto artigo “*Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*” publicado no mesmo ano, Einstein escreve sobre a eletrodinâmica dos corpos baseada no que chamou de princípio da relatividade, ou seja, a formulação da teoria da relatividade restrita. Ele declara dois princípios fundamentais sendo “as mesmas leis da eletrodinâmica e da óptica serão válidas para todos os sistemas de coordenadas nos quais valem as equações da mecânica” e “que a luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida, que é independente do estado de movimento do corpo emissor” (TORT, 2001, p. 143-144); sendo ambos postulados da teoria da relatividade restrita. Para Einstein esses dois postulados eram suficientes para desenvolver a eletrodinâmica de corpos de movimento simples e consistente na teoria de Maxwell para corpos em repouso.

A forma final desses dois postulados ele apresentou mais à frente da seguinte forma:

As considerações seguintes estão baseadas no princípio da relatividade e no princípio da constância da velocidade da luz. Definimos esses dois princípios como:

1. As leis que descrevem a mudança dos estados sistema físicos são independentes de qualquer um dos dois sistemas de coordenadas que estão em movimento de translação uniforme, um em relação ao outro, e que são utilizados para descrever essas mudanças.

2. Todo raio de luz move-se no sistema de coordenadas de “repouso” com uma velocidade fixa  $V$ , independente do fato de este raio de luz ter sido emitido por um corpo em repouso ou em movimento. Portanto, velocidade [é igual] ao comprimento do trajeto da luz [pelo] intervalo de tempo, onde “intervalo de tempo” deve ser entendido da definição dada na seção 1 (TORT, 2001, p. 148).

Muitos problemas envolvendo a luz e o éter haviam surgido antes de Einstein fazer os postulados: houve um fracasso em unificar um conjunto de propriedades plausíveis que pudesse ser atribuída ao éter; nenhum dos experimentos realizados no final do século XIX, puderam detectar o éter (ROTHMAN, 2005, p. 103). Além disso, havia o problema da aberração da luz estelar, que considerando existência do éter, previa um grau de aberração nulo, pois a terra em movimento em relação a ele, arrastaria um pouco de éter em seu movimento e tal fato não foi observado; e a mecânica newtoniana, que necessitava de parâmetro de repouso absoluto em seu formalismo, do qual se podia medir o movimento (o que implicava em espaço e tempo absolutos), estava gerando inconsistência ao ser aplicado ao movimento relativo.

Como mencionamos anteriormente, Maxwell já havia notado que as ondas de luz, moviam-se em velocidade constante. Chegou a pensar que a sua teoria estivesse errada ou que ela fosse aplicável, apenas, em um sistema em repouso em relação ao éter. No entanto, Einstein observou que as equações não estavam erradas e que estas não se alteravam independente da velocidade do sistema. Observou também que as equações se apresentavam as mesmas em qualquer referencial, e que a velocidade da luz seria a mesma para cada referencial considerado (ROTHMAN, 2005, p. 105). Para ele, o conceito de éter estaria errado, visto que, o resultado nulo da velocidade da terra em relação ao padrão absoluto de repouso (éter) medidos por Michelson e Morley, favoreceram ainda mais a sua ideia. Desta forma, as tentativas de explicar da aberração estelar em relação ao padrão absoluto de repouso, também ficaram comprometidas, pois as explicações consideravam a terra em movimento relativo ao éter.

Ainda no quarto artigo Einstein prossegue dizendo que:

A introdução de um ‘éter luminífero’ irá se provar supérflua, uma vez que o ponto de vista a ser desenvolvido aqui não exigirá um ‘espaço em repouso absoluto’, dotado de propriedades especiais, nem atribuirá um vetor velocidade a um ponto do espaço vazio, onde os processos eletromagnéticos estão ocorrendo (TORT, 2001, p. 144).

ou seja, na nova teoria não considera mais a existência do éter como o fator fundamental.

Em 1904, Lorentz publicou outro relatório sobre os resultados nulos do experimento de Michelson-Morley, onde mostrou que as equações de Maxwell se comportavam corretamente sobre a “transformações de Lorentz”, mostrando-se as mesmas antes e depois da aplicação da transformação. Ainda no mesmo ano, Jules Henri Poincaré (1854-1912) demonstrou em alguns documentos técnicos, que as equações de Maxwell eram invariáveis as transformações de

Lorentz (da mesma forma que Lorentz havia encontrado). Também idealiza a combinação do espaço e tempo, que Hermann Minkowski (1864-1909) formularia posteriormente, e encontra a equivalência entre energia e massa ( $E = mc^2$ ) (ROTHMAN, 2005, p. 106-107). Assim, Einstein mostrou que tudo isso se resultaria em apenas dois postulados fundamentais.

Assim temos o fim do teórico éter, independente das propriedades que foram atribuídas a ele. Mas será que precisaremos algum dia resgatarmos este éter? Talvez reformulá-lo para um possível “éter quântico”? Só o tempo e o avanços tecnológicos e científicos poderão, algum dia, responder essas indagações.

Apesar de o éter não ser considerado na teoria da Relatividade Especial, parece que Einstein não aboliu completamente o conceito de éter da teoria da Relatividade. Em uma conferência realizada em 1920 na Universidade de Leiden (cinco anos após de concluir a teoria da relatividade Geral), Einstein diz que “Uma reflexão mais cuidadosa nos ensina, contudo, que a teoria especial da relatividade não nos compele a negar o éter” (ROTHMAN, 2005, p. 109). Ou seja, a relatividade especial aboliu a noção que o éter tinha se tornado: um conjunto de propriedades, uma forma de justificar o que não era justificável. Einstein complementa dizendo que “negar o éter é, em última análise, presumir que o espaço vazio não possui quaisquer qualidades físicas. Os fatos fundamentais da mecânica não se ajustam a esta visão.” (ROTHMAN, 2005, p. 110), nisto ele está se referindo ao campo gravitacional. Portanto, Einstein mostrou que o espaço vazio de toda matéria poderia ter propriedades dinâmicas, o que afetaria o modo dos objetos se movimentarem. Desta forma, após a exclusão do éter da teoria da relatividade restrita, ele o resgata na teoria da relatividade geral, na forma de campo gravitacional.

## 4 PROPRIEDADES DA LUZ

Nesta parte final do trabalho apresentamos algumas das principais propriedades da luz e como a entendemos e explicamos nos dias atuais. Apresentaremos um resumo dos conceitos que foram discutidos no decorrer deste trabalho e assim, esclarecer onde chegamos em conhecimento acerca da luz e suas propriedades após as contribuições de todos estes filósofos e pensadores ao longo do tempo, e dessa forma mostrar como se constrói uma teoria, o conhecimento, ou seja, como se dá a evolução de um conceito no mundo científico.

Atualmente, a luz é considerada tendo simultaneamente a natureza corpuscular e ondulatória. A luz apresenta a sua natureza ondulatória ao se propagar pelo espaço, como ocorre nos fenômenos de difração, interferência e polarização. Já sua natureza corpuscular se apresenta quando interage com a matéria, como ocorre nos efeitos Compton e fotoelétrico.

Como onda, a luz é descrita como sendo uma onda eletromagnética que apresenta frequência, comprimento de onda, período, amplitude, para explicar os fenômenos de difração, interferência e polarização. Como partícula, a luz é conhecida como fóton, apresentando um momento linear, que explica os efeitos Compton e fotoelétrico.

A Óptica é um ramo da Física que analisa e manipula as ondas eletromagnéticas abrangentes do espectro eletromagnético e suas interações com a matéria (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 154-155).

### 4.1 Óptica Geométrica

Na Óptica Geométrica, a luz é considerada com um raio (**Raio de luz**) que se propaga de um ponto ao outro. É representada como uma seta que indica de onde surge e se dirige, a trajetória da luz em um determinado espaço (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 155). O conjunto de raios de luz é chamado de **feixe de luz**.

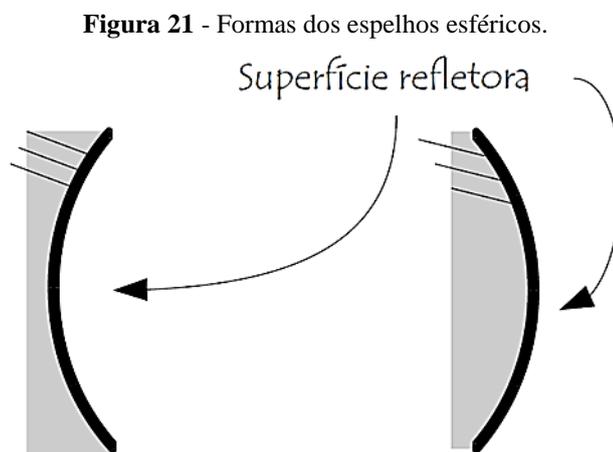
Em um meio homogêneo, transparente e isotrópico, a luz se propaga em linha reta (**Princípio da Propagação Retilínea da Luz**). Quando dois raios de luz se cruzam, não sofre interferência na trajetória, não interagindo entre si, ou seja, ambos se comportam como se um não existisse para o outro (**Princípio da Independência dos Raios de Luz**). Se revertermos o sentido de propagação de um raio de luz ele continua a percorrer a mesma trajetória (**Reversibilidade dos Raios de Luz**).

A **sombra** é entendida como ausência de luz, sendo causado pelo o bloqueio dos raios em um corpo opaco e obedecendo o princípio da propagação retilínea da luz, vemos a formação de sombra nos objetos.

Os materiais em que a luz se propaga em linha reta, não sendo interferida (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 140), chamamos de **meios transparentes**. Já materiais em que a luz não passa de forma ordenada denominamos de **meios translúcidos**, pois ao atravessar o meio os raios são espalhados em vários sentidos. E os **meios opacos** são materiais em que a luz não atravessa o meio, sendo bloqueada completamente a sua passagem (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 139).

Referente as fontes de luz, temos os corpos que tem capacidade própria de emitir luz que são classificados como **fontes primárias de luz**; e os corpos que refletem parte da luz incidente, não possuindo luz própria, estas se classificam como **fontes secundárias de luz**.

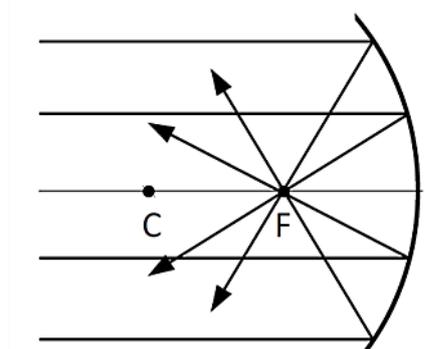
No desenvolvimento do entendimento da natureza da luz surgem os objetos ópticos: espelhos e lentes. Os **espelhos** são superfícies extremamente polidas capazes de mudar a direção da luz incidente e espalhar a luz de forma uniforme (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 134). Podem ser planos, esféricos ou parabólicos. Os **espelhos esféricos** são espelhos que possuem sua superfície refletora curvada geometricamente em forma de esfera. Podem ser nos formatos côncavos ou convexos (figura 21).



Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 31.

Os **espelhos esféricos côncavo** possuem a curvatura da superfície refletora voltada para dentro, como na figura 22 (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 136).

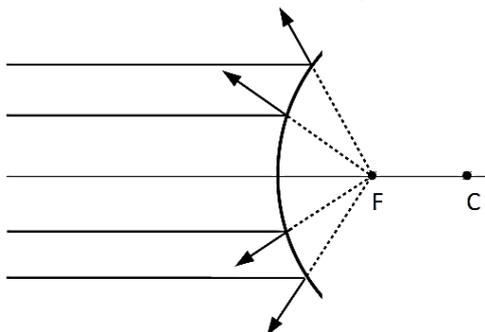
**Figura 22** - Reflexão dos raios de luz em um espelho côncavo



Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 32.

Já os **espelhos esféricos convexo** possuem a curvatura da superfície refletora voltada para fora, como ilustrado na figura 23 (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 136).

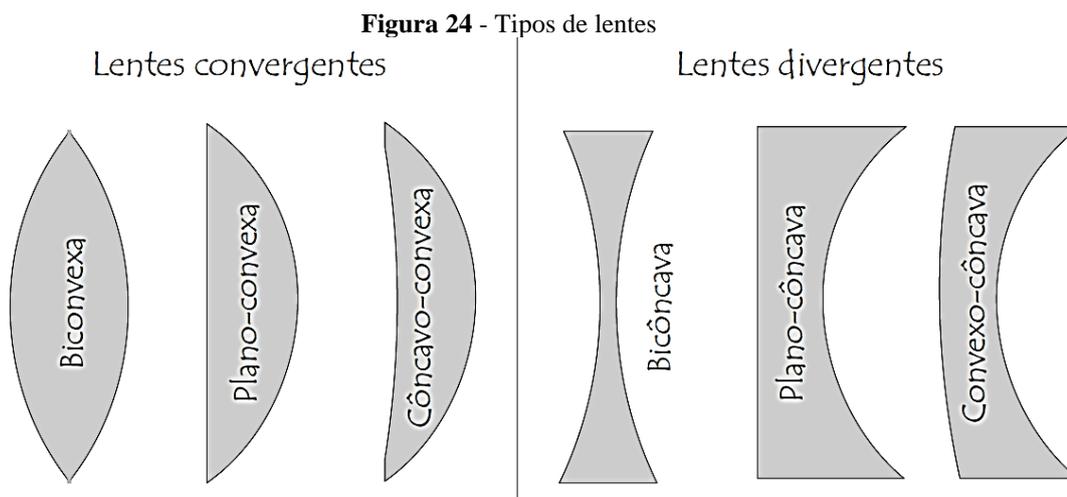
**Figura 23** - Reflexão dos raios de luz no espelho convexo



Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 33.

E os **espelhos parabólicos** são espelhos que possuem a superfície refletora curvada geometricamente na forma de parábola.

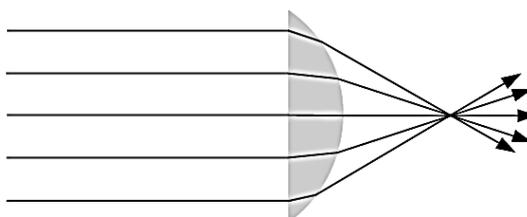
As **lentes esféricas** apresentam como transparente cuja função é que refrata a luz (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 145). Uma de suas superfícies tem o formato esférico e a outra pode ter o formato plano ou esférico também (figura 24) e sua classificação é baseada em como os raios manipulados.



Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 49

As **lentes convergentes** possuem o meio mais espesso que as bordas, e direciona os raios de luz para um único ponto, o foco, como na figura 25 (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 146).

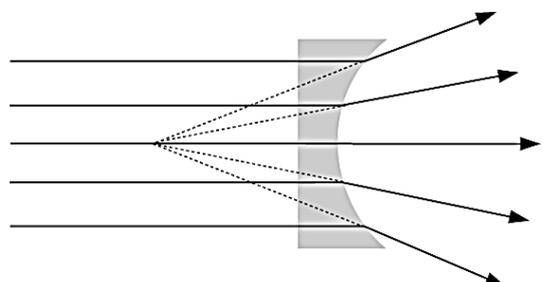
**Figura 25** - Difração dos raios de luz na lente convergente



Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 48.

Já as **lentes divergentes** possuem o meio menos espesso que as bordas, e provoca a divergência dos raios de luz como se esses estivessem partindo de um mesmo ponto, o foco, como na figura 26 (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 146).

**Figura 26** - Difração dos raios de luz na lente divergente

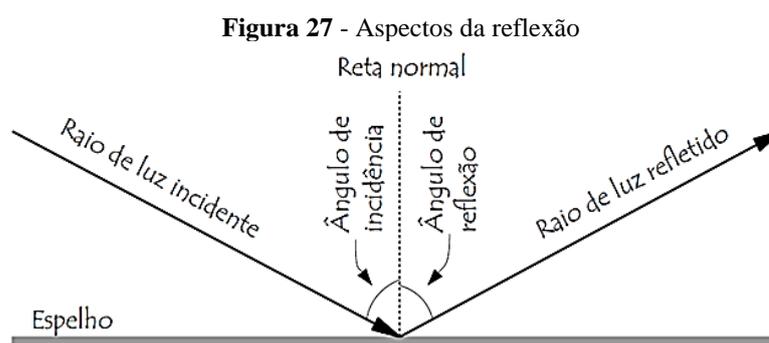


Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 48.

Na formação das imagens pelos objetos ópticos: lentes e espelhos, pode ser do tipo **imagem real**, que pode ser projetada em um anteparo, como uma parede, por exemplo; ou **imagem virtual**, que não pode ser projetada em um anteparo.

#### 4.1.1 Reflexão

A reflexão é um fenômeno físico em que a luz incidente na superfície de um corpo refletor altera a direção dos raios de luz, retornando-os de volta do meio que vieram. As **leis da reflexão** dizem que os raios refletidos pertencem ao mesmo plano de incidência, e que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência, como ilustrado na figura 27 (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 134).

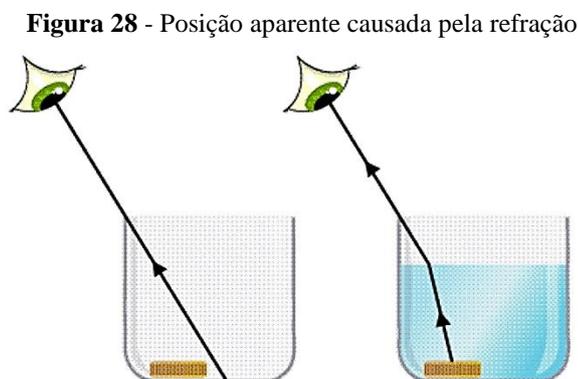


Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 16.

O **ângulo de incidência** é o ângulo formado entre a direção dos raios incidentes chegam a superfície com a reta perpendicular ao espelho {reta normal} (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 134). Já o **ângulo de reflexão** é o ângulo que se forma direção dos raios refletidos faz com a reta normal (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 134), como indicado na figura 27.

#### 4.1.2 Refração

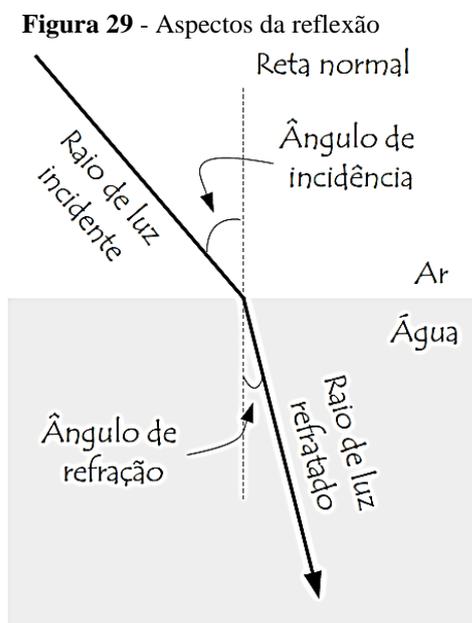
A refração é um fenômeno onde os raios de luz tem a sua direção alterada ao passar de um meio transparente para outro, com densidades diferentes. (ver figura 28).



Fonte: Só Biologia<sup>29</sup>.

<sup>29</sup> Disponível em: [https://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava\\_serie/optica8.php](https://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/optica8.php). Acesso em: jun. 2018.

As **leis da refração** dizem que o raio de luz incidente, o raio refratado e o eixo normal estão contidos no mesmo plano, como na figura 29; e que os senos dos ângulos dos raios incidentes e refratados, são diretamente proporcionais às velocidades da luz nos respectivos meios.



Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 31.

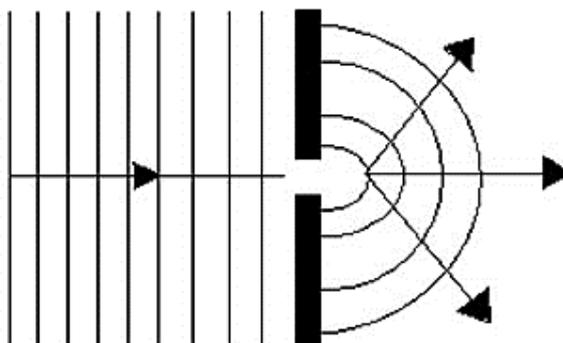
## 4.2 Óptica Ondulatória

Na Óptica Ondulatória, a luz é considerada como uma onda, atrelada às propriedades eletromagnéticas. Os fenômenos de difração, polarização e interferência, são explicados com base no eletromagnetismo.

### 4.2.1 Difração

A difração é um fenômeno de aparente flexão das ondas, que acontece ao passar por pequenos obstáculos, orifícios ou fendas (ver figura 30). Para que ocorra a difração, os obstáculos ou orifícios precisam ser do tamanho do comprimento de onda. Se forem maiores não ocorre uma difração.

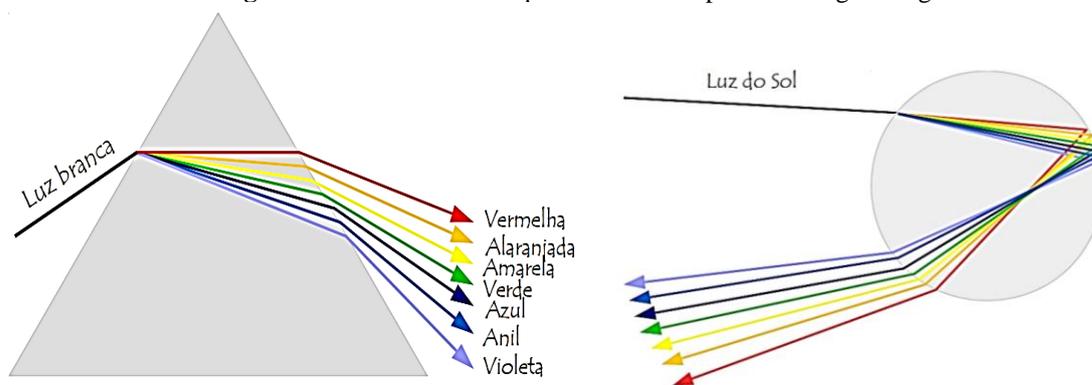
**Figura 30** - Representação de difração causada por um furo



Fonte: O Labirinto Científico<sup>30</sup>.

Atrelada ao desenvolvimento do que seria o fenômeno de difração, surge a **dispersão cromática**, um processo que separa da luz branca em várias cores do espectro visível por meio da refração ou difração (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 148). A separação ocorre quando as componentes que formam a onda eletromagnética visível, passam por um meio, no qual o índice de refração varia de acordo com o comprimento de onda de cada componente (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 155), como ilustrado na figura 31.

**Figura 31** - Processo de Dispersão da luz no prisma e na gota d'água



Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 44 e 45.

Como consequência da dispersão cromática, surge o conceito de **cores primárias**, um conjunto de cores base, que misturadas entre si em proporções variadas, reproduzem a sensação visual que abrange o espectro visível, como ilustrado na figura 32 (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 150). As cores primarias da Luz são: vermelho, verde azul. Para pigmentos são: vermelho, amarelo e azul.

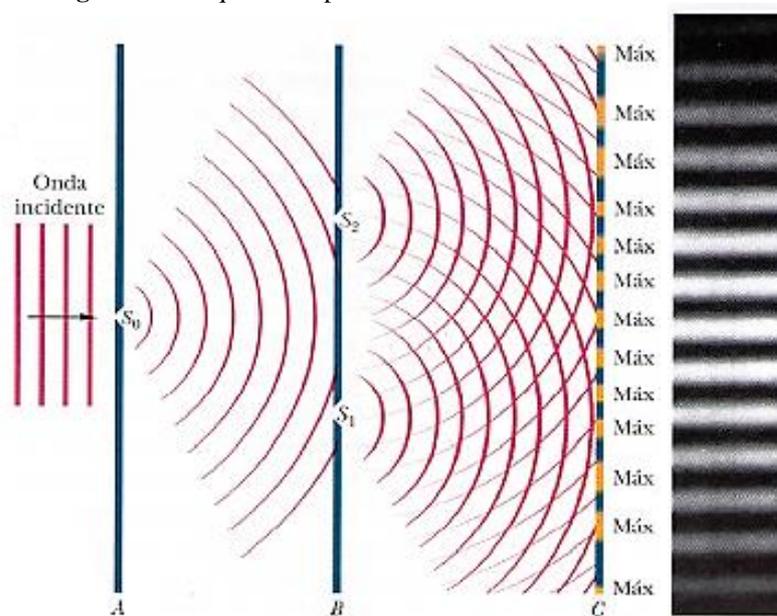
<sup>30</sup> Disponível em: <https://olabirintocientifico.blogspot.com/2011/11/um-grande-exemplo-de-difracao.html>. Acesso em: 14 jun. 2018.

**Figura 32** - Padrão de formação das cores para luz

Fonte: NOGUEIRA, 2015, p. 21.

#### 4.2.2 Interferência

A interferência é um fenômeno onde ocorre a superposição de duas ou mais ondas no mesmo ponto, podendo ter caráter de aniquilação (interferência destrutiva) ou reforço (interferência construtiva), como ilustrado na figura 33 (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 9 e 10).

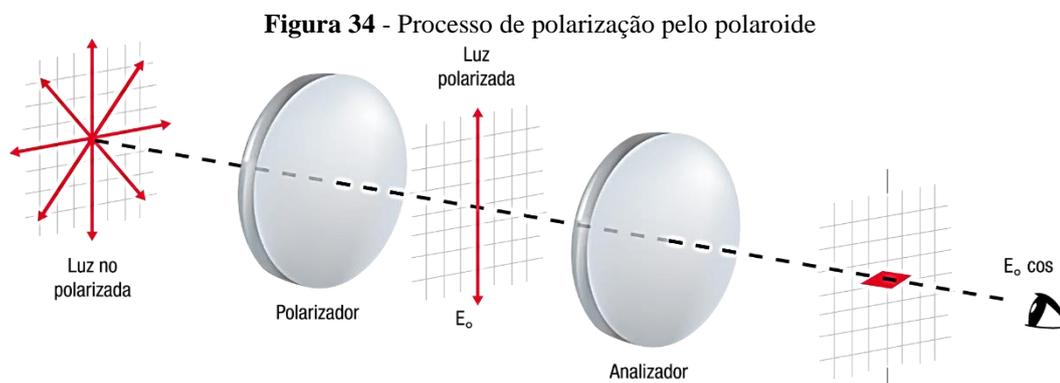
**Figura 33** - Esquema do processo de interferência e o resultado

Fonte: A Física Moderna no Ensino Médio<sup>31</sup>.

<sup>31</sup> Disponível em: <https://sites.google.com/site/afisicamodernadoensinomedio/topicos-de-fisica-moderna-e-contemporanea/a-dualidade-onda-particula-da-luz/a-difracao-e-interferencia-da-luz>. Acesso em: jun. 2018.

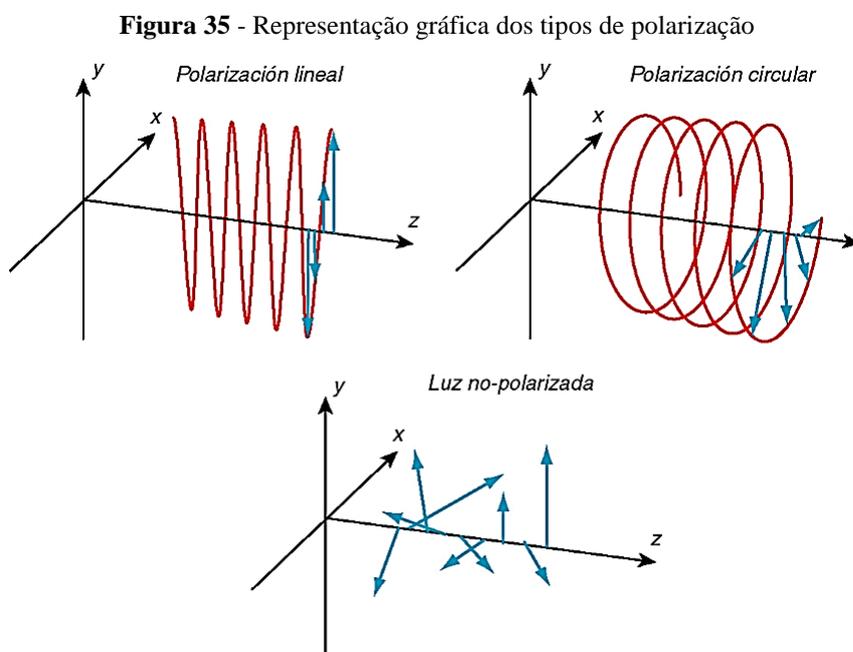
### 4.2.3 Polarização

A polarização é uma propriedade das ondas eletromagnéticas que descreve a orientação das suas oscilações, sendo linear ou circular. Na **polarização linear**, as oscilações do campo elétrico são orientadas em uma única direção, como na figura 34.



Fonte: Educaplus<sup>32</sup>.

Já a **polarização circular ou elíptica**, a orientação dos campos elétricos das ondas eletromagnéticas está girando à medida que se deslocam (figura 35), podendo ser para a direita (sentido horário) ou para esquerda (sentido anti-horário).



Fonte: ReseachGate<sup>33</sup>.

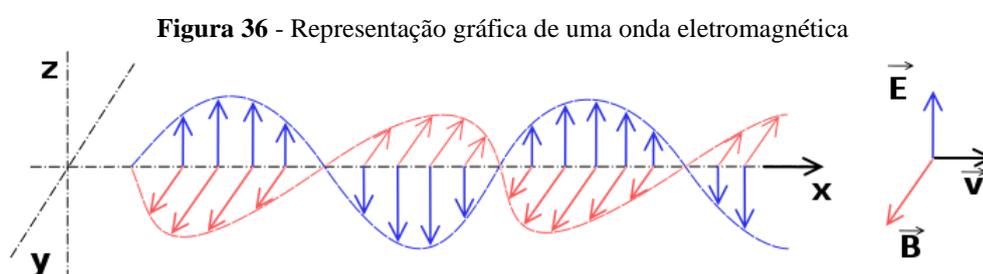
<sup>32</sup> Disponível em: <http://www.educaplus.org/luz/polarizacion.html>. Acesso em: jun. 2018.

<sup>33</sup> Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Diferentes-tipos-de-polarizacion-de-la-luz-Las-lineas-azules-indican-el-campo\\_fig1\\_291351380](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Diferentes-tipos-de-polarizacion-de-la-luz-Las-lineas-azules-indican-el-campo_fig1_291351380). Acesso em: jun. 2018.

Pode ocorrer **polarização por reflexão** na superfície de corpos transparentes, cujo o raio refletido é de polarização parcial, podendo variar de acordo com o ângulo do raio incidente, com o comprimento de onda da luz e com os meios transparentes. Também, **polarização por refração**, que ocorre na refração da luz incidente na superfície de corpos transparentes, cujo o raio refratado é de polarizado parcialmente. E **polarização por absorção**, que ocorre na refração da luz incidente na superfície de corpos transparentes formando dois raios distintos, sendo que um é refratado naturalmente e o outro refratado por polarização. Este fenômeno é chamado de dupla refração.

### 4.3 Óptica Quântica

A Óptica Quântica é um campo de pesquisa onde os fenômenos que envolvem a luz e a sua interação com a matéria em escala atômica. Este campo envolve tanto os **fótons**, pacotes discretos de energia que se deslocam como pequenas partículas, quanto as **ondas eletromagnéticas**, que são oscilações dos campos elétricos e magnéticos, perpendiculares entre si e autossustentáveis (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 113), como ilustrado na figura 36.



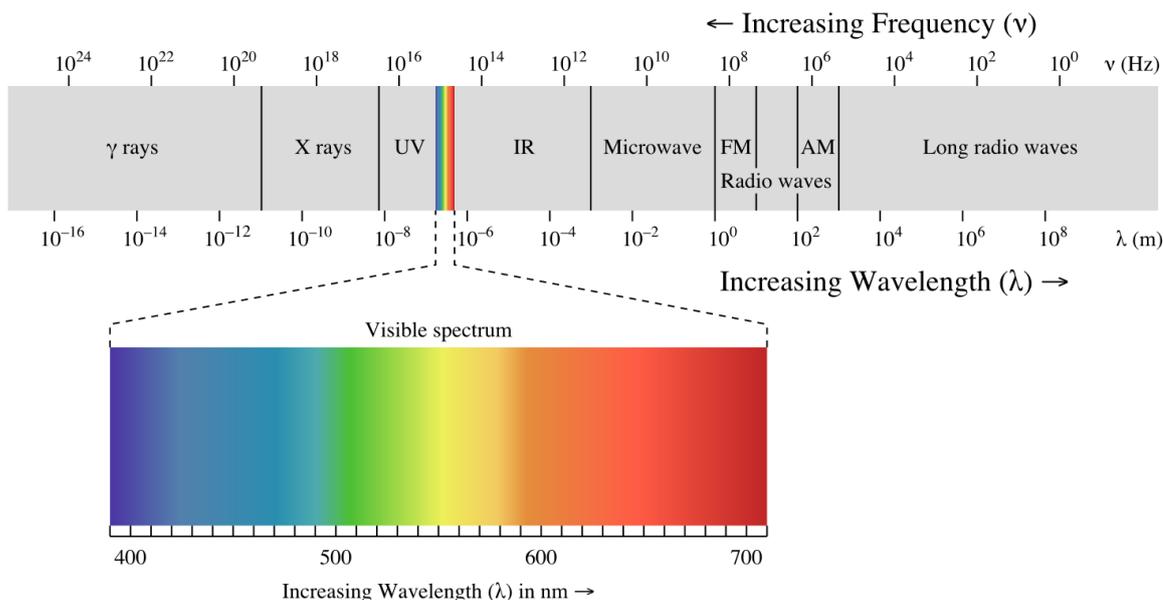
Fonte: Wikipédia<sup>34</sup>.

Todos os tipos de ondas eletromagnéticas do **espectro eletromagnético** estão incluídos, desde as ondas de rádio até os raios gama (ver figura 37). Inclusive o **espectro visível**, que compreende todo o conjunto de ondas eletromagnéticas capazes de sensibilizar a visão humana (TREFIL e HAZEN, 2006, p. 128).

Na Óptica Quântica a luz pode ser classificada como **luz monocromática**, composta por uma cor do espectro visível, com por exemplo o laser; ou **luz policromática**, composta por mistura de duas ou mais cores diferentes do espectro visível.

<sup>34</sup> Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Radia%C3%A7%C3%A3o\\_eletromagn%C3%A9tica](https://pt.wikipedia.org/wiki/Radia%C3%A7%C3%A3o_eletromagn%C3%A9tica). Acesso em: jun. 2018.

**Figura 37** - Espectro eletromagnético



Fonte: Wikipédia<sup>35</sup>.

O **comprimento de onda**, distância entre dois máximos ou mínimos consecutivos; o **período**, tempo que uma onda demora para percorrer a distância entre dois máximos ou mínimos consecutivos; a **frequência**, que é número de comprimentos de onda que passam por um ponto, em um intervalo de tempo; a **amplitude**, altura máxima dos máximos ou mínimos da oscilação, e a **velocidade da luz**, a qual todas as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo, cujo o valor é de 299.792.458 m/s, são os conceitos que se mostram mais presentes na optica quântica.

Alguns fenômenos que podem ser explicados pela optica quântica, tais como: **incandescência** (corpos quentes que emitem luz por radiação térmica), **luminescência** (corpos frios que emitem luz), **quimiluminescência** (emissão de luz por reações químicas), **bioluminescência** (emissão de luz nos corpos de seres vivos), **triboluminescência** (emissão de luz por compressão de certos cristais) e **sonoluminescência** (emissão rápida de luz em bolha que surgem da estimulação sonora, geralmente na faixa no ultrassom).

<sup>35</sup> Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Radia%C3%A7%C3%A3o\\_eletromagn%C3%A9tica](https://pt.wikipedia.org/wiki/Radia%C3%A7%C3%A3o_eletromagn%C3%A9tica). Acesso em: jun. 2018.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através de aspectos da história da ciência, este trabalho apresentou a evolução do conceito de luz e suas interpretações ao longo do tempo. Buscamos fazê-lo de forma não formulista e motivadora. Utilizamos os textos originais, quando encontrados e realizamos traduções do inglês para o português de forma a reunir as principais referências em um único trabalho.

No capítulo 2 vimos que, os chineses já apresentavam uma ideia da linearidade dos raios de luz muito antes das concepções gregas, e já usavam a ideia de luz como flecha para descrever a trajetória retilínea. Cronologicamente, foram os primeiros a descrever a formação das imagens em espelhos côncavos e convexos, a usar lentes de gelo para produzir fogo, a utilizar a reflexão de espelhos planos como ferramenta de vigilância, a implementar a matemática nos fenômenos óticos, a classificar as lentes e usá-las de forma composta.

Já os filósofos gregos, romanos e greco-egípcios se dividiram, se podemos dizer, em dois grupos com duas linhas de pensamento diferentes sobre a visão e a forma como enxergamos os objetos: aqueles que consideravam que os raios visuais saíam dos olhos para o objeto (Pitágoras, Platão, Euclides e Herão), e os que consideravam que as imagens saíam do objeto para os olhos (Leucipo, Demócrito, Epicuro, Lucrécio). As exceções à regra foram Empédocles e Cláudio Ptolomeu, que consideravam as duas linhas de pensamento como possíveis, e Aristóteles, que considerava que a possibilidade de ver estivesse condicionada ao estado de transparência do ar.

Os indianos Gautama, Vatsyayana, Uddyotakara e outros, seguem uma linha de pensamento semelhante a dos gregos, quanto a percepção do objeto pelos raios visuais, suas explicações foram além dos aspectos apontados por eles. Os indianos já explicavam de forma satisfatória a percepção de objetos através de corpos transparentes pelos raios visuais e o porquê que estes não apresentavam cor; tinham uma ideia de fontes primárias; jugavam a cor como uma característica manifestada dos corpos; a transparência era entendida como uma cor especial; consideravam a luz externa como um fator importante para o ato de ver; consideravam também uma movimentação rápida dos raios visuais, sendo condicionada a transparência e podiam percorrer grandes distâncias.

Os árabes Al-Kindi, Al-Haitam e Avicenna contribuíram significativamente na concepção da luz e seus fenômenos. Herdaram muitas ideias da filosofia grega, consideravam que os raios visuais como sendo os mediadores do ato de ver; criaram uma classificação das fontes luminosas: fontes primárias e secundárias e acreditavam que a velocidade da luz era

infinita e que a luz seria uma mistura de cores. Para eles as cores seriam independentes dos objetos, sendo estes invisíveis na ausência de luz.

Na Europa medieval, a luz sempre esteve ligada aos aspectos religiosos, mas vemos as primeiras explicações da luz no ponto de vista metafísico. A luz foi considerada como a primeira forma de corporeidade, como uma extensão da matéria, que se auto difundia e multiplicava radialmente pelo espaço tridimensional formado por ela, sendo descrita matematicamente essa propagação. Além disso, os raios de luz ainda foram usados na descrição fisiológica e funcional dos olhos e na formação das imagens dentro dos mesmos. Temos também nesse período a descrição do fenômeno da reflexão e os estudos sobre lentes na Europa.

No capítulo três exploramos o século XVII, com o desenvolvimento das teorias ondulatórias e corpuscular para a luz com base na mecânica de corpos rígidos. Newton é tido como defensor do modelo corpuscular e Huygens o defensor do modelo ondulatório. Apesar dos livros didáticos dizerem que havia uma rivalidade entre as teorias de Newton e Huygens, se observarmos os textos originais percebemos que essa rivalidade não existiu. O próprio Huygens diz que seu trabalho era uma forma de interpretar os fenômenos ópticos de sua época. A rivalidade que observamos na pesquisa, ocorreu entre Newton e Hooke, por sentir-se afrontado pelas as críticas de Hooke ao artigo de 1672. Além disso, Hooke se posicionou a favor da teoria ondulatória da luz, o que deixou Newton mais irritando ainda.

Outro fato curioso que destacamos é o de que Young não deixa claro se fez ou não a experiência da interferência dupla fenda como os livros didáticos alegam. Ele apenas descreve uma breve passagem na palestra 39, que seu objetivo era aplicar o mesmo raciocínio de interferência das ondas de água e a noção de interferência sonora, na explicação da interferência luminosa. Não vemos também nos textos originais, qualquer ilustração da interferência luminosa atribuída a Young na descrição dessa palestra, mas sim na palestra 23, onde ele ilustra a interferência das ondas de água em recipiente retangular. Em contrapartida, vemos Fresnel realizando o experimento de interferência, não com duas fendas paralelas, mas usando obstáculos, objetos finos e aberturas em anteparos para difratar os raios de luz, cujo padrão de interferência é o mesmo apresentado pela dupla fenda, e ainda conseguiu descrever matematicamente o fenômeno. O que podemos inferir disso é que Fresnel realizou o experimento e não Young como afirmam os livro-textos. Apesar disso, Young foi o primeiro formular, de forma mais consistente, a teoria ondulatória e que conseguiu explicar de forma satisfatória os fenômenos de difração, polarização e interferência luminosa.

Vimos que, Faraday já observava indícios de uma unificação entre a eletricidade-magnetismo e a óptica, que foi evidenciada pelo experimento a rotação do raio de luz polarizado

usando os princípios do magnetismo e eletrostática. Maxwell também observou o mesmo, e provou nos artigos 1862 e 1865, matematicamente, que a velocidade das ondas luminosas descritas em seu modelo eram “iguais” aos valores medidos experimentalmente em sua época. Além disso, seu modelo usava a ideia de campo para explicar os fenômenos eletromagnéticos, não apresentando uma necessidade de teorizar algum éter em específico.

Outro ponto alto da história foi o problema da radiação de corpo negro que gerou em cinquenta anos, uma série de pesquisas para descrever o fenômeno. Planck surge para explicar o elo que faltava na descrição do espectro, no entanto, ele precisou conjecturar que a matéria se comportava como osciladores e que sua energia era descontínua. Isto era totalmente contrário a física de sua época. Einstein aparece confirmando o que Planck havia encontrado, como resultado da explicação do efeito fotoelétrico. Isto provocou uma quebra de paradigmas físicos, necessitando de uma nova formulação de uma nova mecânica.

Além disso, Einstein provoca outra quebra de paradigma, quando publica a teoria da relatividade restrita. Einstein postula que a velocidade da luz é constante e que as leis físicas devem ser as mesmas em qualquer referencial inercial. Com isso elimina o conceito de éter, e percebe-se que as radiações eletromagnéticas não precisam de um meio para se propagar. Einstein, portanto, contribui não só para entender a natureza da luz, assunto relacionado a Física Quântica, como também para descobrir as particularidades da sua velocidade, inaugurando a Teoria da Relatividade. Ambas são tidas como os pilares da Física Moderna e necessária para compreensão do nosso mundo atual.

No capítulo 4, apresentamos um resumo das definições atuais dos principais conceitos envolvidos a natureza da luz e suas propriedades. A luz entendida como dualidade onda-partícula, as diferentes físicas óptica, geométrica, ondulatória e quântica são apresentadas de forma resumida na intenção de concluir as ideias apresentadas no decorrer de todo trabalho.

Mostrar os fatos em ordem cronológica, a construção do conceito, o trabalho dos cientistas, as ideias preexistentes e o modo de fazer ciência são sempre ignorados nos livros didáticos e manuais. Esperamos que com este trabalho possamos contribuir para que história da ciência passe a ser abordada e também conhecida, estimulando assim o gostar e saber Física, ou melhor ainda, o fazer Física.

## REFERÊNCIAS

ARISTÓTELES. **Sobre a Alma (De anima)**. Tradução de Ana Maria Lóio. 1ª. ed. Lisboa: Imprensa Nacional - Casa da Moeda, v. III Tomo I, 2010. p. 80-85. ISBN 978-972-27-1892-9.

BASSALO, J. M. F. Fresnel: O Formulador Matemático da Teoria Ondulatória da Luz. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 79-87, agosto 1988. ISSN 2175-7941. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/9821/9052>>. Acesso em: 18 janeiro 2018.

BASSALO, J. M. F. A Crônica da Ótica Clássica (Parte III: 1801-1905). **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 37-58, abril 1989. ISSN 2175-7941. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/7719/15172>>. Acesso em: 18 Janeiro 2018.

BERNADO, L. M. **História da luz e das Cores: Lenda - Superstição - Magia - História - Ciência - Técnica**. 2ª. ed. Porto: Editora Up, v. I, 2009. p. 45-54, 56-59, 109-121. ISBN 978-972-8025-87-8. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=YZL2h1jn8cC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 13 Outubro 2017.

BERRYMAN, S. Democritus. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2016a. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/democritus/>>. Acesso em: 17 outubro 2017.

BERRYMAN, S. Leucippus. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2016b. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/leucippus/>>. Acesso em: 29 março 2018.

BORNHEIM, G. A. **Os Filósofos Pré-socráticos**. 14. ed. São Paulo: Editora Cultrix, 2000. 76, 127 p. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=JWSSgXucWUQC&pg=PA6&dq=fragmentos+de+emp%C3%A9docles&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwiFz5qzrvjWAhWDE5AKHQDyD58Q6AEIJzAA#v=onepage&q=fragmentos%20de%20emp%C3%A9docles&f=false>>. Acesso em: 22 Novembro 2017.

CLOONEY, F. X. **Hindu God, Christian God: How Reason Helps Break Down the Boundaries between Religions**. [S.l.]: Oxford University Press, 2001. p. 18. ISBN 978-0199738724.

EINSTEIN, A. Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light. **American Journal of Physics**, 33, n. 5, maio 1965. 1-16. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/ed6e/cc78f52fc289d5aa87142aa1ba4ac36d99e6.pdf>>. Acesso em: 1 junho 2018.

FARADAY, M. I. Experimental researches in electricity - Nineteenth series: On the magnetization of the light and the illumination of magnetic lines of force. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Londres, v. 136, p. 1-20, 1 janeiro 1846.

Disponível em: <<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/136/1.full.pdf>>. Acesso em: 12 Maio 2018.

FRASER, C. Mohism. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2015. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/win2015/entries/mohism/>>. Acesso em: 28 março 2018.

GAN, F.; TIAN, S. **History of Modern Optics and Optoelectronics Development in China**. [S.l.]: World Century Publishing; World Scientific Publishing, v. I, 2014. p. 1-3. ISBN 978-981-4518-75-8.

GOTAMA, A. **The Sacred Books of the Hindus**: Translated by various Sanskrit Scholars - The Nyaya Sutra of Gotama. Tradução de Mahamahopadhyaya Satisa Chandra Vidyabhusana. Calcutá: The Indian Press, v. VIII, 1913. p. 70-75. Disponível em: <[https://ia801406.us.archive.org/35/items/TheNyayaSutrasOfGotama/Vidyabhusana\\_NyayaSutras\\_1913.pdf](https://ia801406.us.archive.org/35/items/TheNyayaSutrasOfGotama/Vidyabhusana_NyayaSutras_1913.pdf)>. Acesso em: 17 outubro 2017.

HOOKE, H. **Micrographia**: O algumas descripciones fisiológicas de los cuerpos diminutos realizadas mediante cristales de aumento con observaciones y disquisiciones sobre ellas. Tradução de Carlos Solís. Madri: Alfaguara, 1989. 253 p. ISBN 84-204-0188-9.

HUFFMAN, C. Pythagoras. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2014. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/pythagoras/>>. Acesso em: 28 março 2018.

HUYGENS, C. **Tratado sobre a Luz onde são explicadas as causa daquilo que lhe acontece na reflexão e na refração e particularmente na estranha refração no cristal da Islândia**. Tradução de Roberto de Andrade Martins. Suplemento 4. ed. Campinas: Unicamp, 1986. 99 p. ISBN 01013424. Disponível em: <<http://www.cle.unicamp.br/eprints/index.php/cadernos/issue/view/229>>. Acesso em: 11 abril 2018.

JHA, M. G. **The Nyaya-Sutra of Gautama with the Bhasya of Vatsyayana and the Vartika of Uddyotakara**. Nova Delhi: Shri Jainendra Press, v. III, 1984. p. 1180-1222. Disponível em: <<https://ia802801.us.archive.org/12/items/NyayaSutrasOfGautamaVol.3MLBD/Nyaya%20Sutras%20Of%20Gautama%20%20vol.%203%20MLBD.pdf>>. Acesso em: 2 novembro 2017.

KIRCHHOFF, G. R. I. On the relation between the radiating and absorbing powers of different bodies for light and heat. **Philosophical Magazine**, 20, n. 130, Julho 1860. 1-21. Disponível em: <[sci-hub.tw/10.1080/14786446008642901#](http://sci-hub.tw/10.1080/14786446008642901#)>. Acesso em: 29 maio 2018.

KIRK, G.; RAVEN, J. E.; SCHOFIELD, M. **Os Filósofos Pré-socráticos**: História com Seleção de Textos. Tradução de Carlos Alberto Louro Fonseca. 7ª. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010. 323-324; p. 452-453. ISBN 978-972-31-0503-2.

KONSTAN, D. Epicurus. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2016. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/fall2016/entries/epicurus/>>. Acesso em: 29 março 2018.

KRAPAS, S.; QUEIROZ, G. R. P. C.; UZÊDA, D. O tratado sobre a Luz de Huygens: Comentários. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, 28, n. 1, abril 2011. 123-151. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/2175-7941.2011v28n1p123>>. Acesso em: março 2018.

KUHN, T. S. Revisiting Planck. **Historical Studies in the Physical Sciences**, v. 14, n. 2, p. 231-252, 1984. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/27757534>>. Acesso em: 30 maio 2018.

LAËRTIUS, D. **Vida e Doutrina dos Filósofos Ilustres**. Tradução de Mario da Gama Kury. 2ª. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2008. p. 234-235, 293-297, 305-306, 308. ISBN 978-85-230-0479-8.

LEONARD, W. E. **The fragments of Empedocles**. Chicago: The Open Court Publishing Company, 1908. 42-43 p. Disponível em: <<https://ia800200.us.archive.org/10/items/cu31924028975923/cu31924028975923.pdf>>. Acesso em: 20 Novembro 2017.

MALLIK, D. N. **Optical Theories - Based on lecture delivered before the Calcutta University**. Londres: Cambridge University Press, 1917. 1-4 p. Disponível em: <<https://ia800207.us.archive.org/28/items/opticaltheories00mallgoog/opticaltheories00mallgoog.pdf>>. Acesso em: 18 outubro 2017.

MARTINS, R. D. A. **O universo: teorias da sua origem e evolução**. 4ª. ed. São Paulo: Moderna, 1996.

MARTINS, R. D. A. O Éter e a Óptica dos Corpos em Movimento: A Teoria de Fresnel e as Tentativas de Detecção do Movimento da Terra, antes dos Experimentos de Michelson e Morley (1818-1880). **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 52-80, abril 2012. ISSN 2175-7941. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/download/2175-7941.2012v29n1p52/21603>>. Acesso em: 29 Abril 2018.

MARTINS, R. D. A.; SILVA, C. C. As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4202-1-4202-32, 12 Dezembro 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173731817>>. Acesso em: 16 Março 2018.

MASINI, A. C. S. A História do Éter. **Casa da Cultura**, 2000. Disponível em: <[http://www.casadacultura.org/andre\\_masini/ensaios/historia\\_do\\_eter.html](http://www.casadacultura.org/andre_masini/ensaios/historia_do_eter.html)>. Acesso em: 19 maio 2018.

MAXWELL, J. C. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. **Philosophical Transactions of Royal Society**, Londres, v. 155, p. 459-512, 1 Janeiro 1865. Disponível em: <<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/155/459.full.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2018.

MAXWELL, J. C. On Physical Lines of Force - Part III: The Theory of Molecular Vortices applied to Statical Electricity. **Wikisource**, 2011. Disponível em: <[https://en.wikisource.org/wiki/On\\_Physical\\_Lines\\_of\\_Force#Part\\_III:\\_The\\_Theory\\_of\\_Molecular\\_Vortices\\_applied\\_to\\_Statical\\_Electricity](https://en.wikisource.org/wiki/On_Physical_Lines_of_Force#Part_III:_The_Theory_of_Molecular_Vortices_applied_to_Statical_Electricity)>. Acesso em: 18 maio 2018.

MOURA, B. A.; BOSS, S. L. B. Thomas Young e o resgate da teoria ondulatória da luz: Uma tradução comentada de sua Teoria Sobre Luz e Cores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 4203-2-4203-24, outubro/dezembro 2015. ISSN 1806-9126. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v37n4/0102-4744-rbef-37-4-4203.pdf>>. Acesso em: 8 abril 2018.

MURACHCO, H. G. Platão República VI 506d 6 - VII 515d 9: Proposta de Tradução Linear. **Letras Clássicas**, v. 2, p. 171-186, Outubro 1998. ISSN 2358-3150. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/letrasclassicas/article/view/73736/77402>>. Acesso em: 16 Novembro 2017.

NASCIMENTO, C. A. R. D. O Tratado sobre a Luz de Roberto Grosseteste. **Trans/Form/Ação**, Marília, I, 1974. 227-237. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-31731974000100013](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-31731974000100013)>. Acesso em: 18 março 2018.

NEEDHAM, J.; LING, W.; ROBINSON, K. G. **Science and Civilisation in China - Part I: Physics**. 6ª. ed. Cambridge: Cambridge University Press, v. IV, 2004. p. 81-85. ISBN 0-521-058023.

NEWTON, I. Of Colours. **The Newton Project**, outubro 2003. Disponível em: <<http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00004>>. Acesso em: 7 Abril 2018.

NEWTON, I. **Pricípios Matemáticos de Filosofia Natural - Livro I**. Tradução de Trieste Ricci, *et al.* 2ª. ed. [S.l.]: EdUSP, v. I, 2016. p. 289-294. ISBN 978-85-314-0673-7.

NOGUEIRA, F. R. A. **Tópicos de Óptica Geométrica**. Brasília: [s.n.], 2015. Disponível em: <[http://mnpef.fis.unb.br/download/francisco\\_produto1.pdf](http://mnpef.fis.unb.br/download/francisco_produto1.pdf)>. Acesso em: 7 Junho 2018.

OLIVEIRA, M. P. D. Fresnel e o Arrastamento Parcial do Éter: A Influência do Movimento da Terra sobre a Propagação da Luz. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 10, n. 2, p. 157-172, agosto 1993. ISSN 2175-7941. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/7281/14920>>. Acesso em: 27 abril 2018.

PARRY, R. Empedocles. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2016. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/fall2016/entries/empedocles/>>. Acesso em: 29 março 2018.

PEREIRA, R. H. D. S. O Arabe que mudou o Ocidente. **Pequisa FAPESP**, v. 79, p. 90-91, setembro 2002.

POTTER, K. H. **The Encyclopedia of Indian Philosophies**. New Delhi: Motilal Banarsidass Publishers, v. II, 1995. 220-221, 239 p. ISBN 81-208-0309-4. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Bo0FeYVcOmUC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q=Gautama&f=false>>. Acesso em: 10 junho 2018.

RIBEIRO, J. L. P. “Sobre as cores” de Isaac Newton: uma tradução. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 4, p. e4604-1-e4604-18, 12 Junho 2017. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0307>>. Acesso em: 19 Abril 2018.

RONAN, C. A. **História Ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor Ltda, v. I, 1997a. ISBN 8571103798.

RONAN, C. A. **História Ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor Ltda, v. II, 1997b.

ROTHMAN, T. **Tudo é relativo: e outras fábulas da ciência e tecnologia.** Tradução de Dayse Batista. 1ª. ed. Rio de Janeiro: DIFEL, 2005. ISBN 85-7432-064-1.

SHIELDS, C. Aristotle. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2016. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/aristotle/>>. Acesso em: 29 março 2018.

SILVA, C. C.; MARTINS, R. D. A. A "Nova Teoria sobre a Luz e Cores" de Isaac Newton: Uma tradução comentada. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 18, n. 4, p. 313-327, Dezembro 1996. Disponível em: <<http://www.ghc.usp.br/ram-r53.htm>>. Acesso em: 18 Abril 2018.

SILVA, F. W. O. D. A teoria da luz de Newton nos textos de Young. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, p. 1601-1-1601-8, 2009. ISSN 1806-9126. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v31n1/v31n1a10.pdf>>. Acesso em: 26 janeiro 2018.

SIMPSON, D. Lucretius. **Internet Encyclopedia of Philosophy**, online. ISSN 2161-0002. Disponível em: <<https://www.iep.utm.edu/lucretiu/>>. Acesso em: 5 junho 2018.

STUDART, N. A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4, p. 523-535, 4 dezembro 2000a. ISSN 1806-1117/1806-9126. Disponível em: <[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_523.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_523.pdf)>. Acesso em: 24 abril 2018.

STUDART, N. Sobre um Aperfeiçoamento da Equação de Wien para o Espectro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4, p. 536-537, 4 dezembro 2000b. ISSN 1806-1117/1806-9126. Disponível em: <[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_536.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_536.pdf)>. Acesso em: 24 abril 2018.

TORT, A. C. **O Ano Miraculoso de Einstein - Cinco Artigos que Mudaram a Face da Física.** Tradução de Alexandre Carlos Tort. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2001. p. 143-148, 201-221.

TORT, A. C.; CUNHA, A. M.; ASSIS, A. K. T. Uma tradução comentada de um texto de Maxwell sobre a ação a distância. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 3, p. 273-282, 22 agosto 2004. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v26n3/a13v26n3.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2018.

TRAILL, R. R. Letter from Augustin Fresnel to François Arago Concerning the Influence of Terrestrial Movement on Several Optical Phenomena. **The General Science Journal**, p. 1-8, 23 janeiro 2006. Disponível em: <<http://gsjournal.net/Science-Journals/Research%20Papers-Mechanics%20/%20Electrodynamics/Download/889>>. Acesso em: 12 maio 2018.

TREFIL, J.; HAZEN, R. M. **Física viva: uma introdução à física conceitual.** Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC, v. II, 2006. ISBN 85-216-1509-4.

TREMBLAY, J.-M. **René Descartes (1637), La Dioptrique.** Quebec: Universidade de Québec à Chicoutimi, 2002. 15, 17 p. Disponível em: <<http://classiques.uqac.ca/classiques/Descartes/dioptrique/dioptrique.html>>. Acesso em: 04 Abril 2018.

WU, L.-A. et al. Optics in Ancient China. **AAPPS Bulletin**, Nangu, v. 25, n. 4, p. 6-10, 2015. Disponível em: <<http://aappsbulletin.org/myboard/read.php?Board=featurearticles&id=152>>. Acesso em: 30 Novembro 2017.

YOUNG, T. **A Course of Lecture on Natural Philosophy and the Mechanical Arts.**

Londres: Taylor e Walton, v. I, 1845. p. 359-374. Disponível em:

<[https://books.googleusercontent.com/books/content?req=AKW5QaeNh\\_cBCyv7pNugyWke11jWoRg-z98zPix0wz4B3AHBcJY6ULFXctC\\_RYL9n8DIXeTkuS0Hm-vJ6HIgQJK7Mz2RzrXIelqUrpVs29KZndWhREFTr4alIylVqODvTkuI0DcgfHIs1PUTmRC0Eitf6Tj4fT-hTnVLF6rM\\_6Vyd9rRdW7t-O2yIdPZBOXtatNebT5j](https://books.googleusercontent.com/books/content?req=AKW5QaeNh_cBCyv7pNugyWke11jWoRg-z98zPix0wz4B3AHBcJY6ULFXctC_RYL9n8DIXeTkuS0Hm-vJ6HIgQJK7Mz2RzrXIelqUrpVs29KZndWhREFTr4alIylVqODvTkuI0DcgfHIs1PUTmRC0Eitf6Tj4fT-hTnVLF6rM_6Vyd9rRdW7t-O2yIdPZBOXtatNebT5j)>. Acesso em: 18 maio 2018.

ZI, M. **The Mozi: A Complete Translation.** Tradução de Ian Johnston. Hong Kong: The Chinese University Press, 2010. p. 487-495. ISBN 978-962-996-270-8. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=VjptxHhf7roC&pg=PR5&dq=Mozi&hl=pt-BR&source=gbs\\_selected\\_pages&cad=3#v=onepage&q=Mozi&f=false](https://books.google.com.br/books?id=VjptxHhf7roC&pg=PR5&dq=Mozi&hl=pt-BR&source=gbs_selected_pages&cad=3#v=onepage&q=Mozi&f=false)>. Acesso em: Novembro 2017.