

Rafael Cardim Pazim
Cristiano Roberto Buzatto
Nelson Luiz Reyes Marques

DA ANTIGUIDADE AO QUANTUM:

A HISTÓRIA DA ÓPTICA SOB A PERSPECTIVA
EPISTEMOLÓGICA DE BACHELARD



PPGECM - PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENSINO DE CIÊNCIAS E MATEMÁTICA

Passo Fundo
2025

Rafael Cardim Pazim
Cristiano Roberto Buzatto
Nelson Luiz Reyes Marques

DA ANTIGUIDADE AO QUANTUM:

A HISTÓRIA DA ÓPTICA SOB A PERSPECTIVA
EPISTEMOLÓGICA DE BACHELARD

Passo Fundo
2025

P348d Pazim, Rafael Cardim

Da antiguidade ao quantum [recurso eletrônico] : a história da óptica sob a perspectiva epistemológica de Bachelard / Rafael Cardim Pazim, Cristiano Roberto Buzatto, Nelson Luiz Reyes Marques. – Passo Fundo: EDIUPF, 2025.

2.79 MB ; PDF. – (Produtos Educacionais do PPGECEM).

Inclui bibliografia.

ISSN 2595-3672

Modo de acesso gratuito: <http://www.upf.br/ppgecm>.

Este material integra os estudos desenvolvidos junto ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECEM), na Universidade de Passo Fundo (UPF), sob orientação do Prof. Dr. Cristiano Roberto Buzatto e coorientação do Prof. Dr. Nelson Luiz Reyes Marques.

1. Física - Estudo e ensino. 2. Óptica. 3. Teoria do conhecimento. 4. Bachelard, Gaston, 1884-1962. 5. Vygotsky, Levi Semenovich, 1896-1934. 6. Material didático. I. Buzatto, Cristiano Roberto. II. Marques, Nelson Luiz Reyes. III. Título. IV. Série.

CDU: 535

APRESENTAÇÃO DOS AUTORES

Rafael Cardim Pazim

Possui Licenciatura em Física pela Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Mestrado em Física pela mesma instituição e Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade de Passo Fundo (UPF). Atualmente, é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense (IFC), Campus Concórdia.

Contato: rafael.pazim@ifc.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6014548422618717>



CRISTIANO ROBERTO BUZATTO

Graduado em Ciências Biológicas LP/B pela Universidade de Passo Fundo (UPF). Mestrado e Doutorado em Botânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente, atua como professor na área de Botânica na Universidade de Passo Fundo, em cursos de graduação em Ciências Biológicas e Agronomia, além dos Programas de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Ensino de Ciências e Matemática. Também atua em pesquisas e projetos de extensão e é curador do Herbário RSPF. Tem expertise está na área de Botânica, com foco em Taxonomia clássica e filogenética de Orchidaceae, biologia da polinização, biologia reprodutiva, conservação de espécies nativas, coleções biológicas e ensino de botânica.

Contato: cristiano@upf.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9456646408644606>

Nelson Luiz Reyes Marques

Possui Licenciatura em Ciências pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e Licenciatura em Ciências com habilitação em Física pela Universidade Católica de Pelotas (UCPEL). É Mestre em Ensino de Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Doutor em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade Franciscana (UFN). Atualmente, é Professor Titular no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul), Campus Pelotas - Visconde da Graça.

Contato: nelsonmarques@ifsul.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8818290777873861>



LISTA DE QUADROS

- 36** **Quadro 1:** Resumo dos obstáculos epistemológicos propostos por Bachelard (2005)
- 60** **Quadro 2:** Contemporâneos de Descartes e/ou Newton que produziram trabalhos sobre Óptica e a data de publicação de suas obras mais famosas
- 74** **Quadro 3:** Os três principais nomes dos protagonistas do ressurgimento da visão neoatomista
- 78** **Quadro 4:** Possíveis causas do formato alongado do espectro solar projetado na parede pelo uso de um prisma
- 81** **Quadro 5:** Causas e argumentos sobre a origem das cores prismáticas
- 91** **Quadro 6:** Equações gerais de Maxwell
- 93** **Quadro 7:** Principais avanços na física no período 1887-1905
- 95** **Quadro 8:** Explorações sobre o efeito fotoelétrico após o experimento de Hertz
- 98** **Quadro 9:** Consequências da equação $E_{\text{max}} = h\nu - W$
- 110** **Quadro 11:** Resumo das etapas sequenciais
- 112** **Quadro 12:** Organização das atividades da Sequência Didática
- 135** **Quadro 14:** Proposta de perfil epistemológico para o conceito de luz
- 137** **Quadro 10:** Proposta de perfil conceitual para o conceito de luz

LISTA DE FIGURAS

- 33** **Figura 1:** Diagrama utilizado por Euclides para demonstrar a proposição 18. GD é um raio de luz solar, EZ, DE e DB são conhecidos, deseja-se encontrar a altura BA
- 34** **Figura 2:** Concepção de Ptolomeu sobre a acuidade visual. A região mais escura próxima ao eixo de visão possui acuidade maior
- 45** **Figura 3:** Representação de dispositivos para pinturas em perspectiva
- 46** **Figura 4:** Na perspectiva linear, quando o objeto AB é deslocado até D', sua altura aparente C'D' reduz-se pela metade, pois OB é metade de OD'. Na perspectiva angular, quando o objeto AB é deslocado até D, sua altura aparente CD reduz-se pela metade, uma vez que seu ângulo de visão α é metade de β
- 50** **Figura 5:** Diagrama feito por Kepler para explicar a influência dos parâmetros da câmara escura no tamanho da imagem formada por ela
- 65** **Figura 6:** Cuba cheia de uvas parcialmente prensadas. A e B são os furos para os quais o vinho em C, D e E flui
- 68** **Figura 7:** Diagrama ilustrando o fenômeno da reflexão
- 70** **Figura 8:** Diagrama ilustrando o fenômeno da refração
- 71** **Figura 9:** Diagrama ilustrando o fenômeno da refração água-ar
- 79** **Figura 10:** Representação esquemática do experimentum crucis de Newton
- 94** **Figura 11:** Desenho original do ressonador utilizado por Hertz para estudar efeitos de polarização em dielétricos (B)
- 96** **Figura 12:** Amostra dos dados de Rubens e Kurlbaum que levaram Planck a deduzir sua fórmula de radiação
- 114** **Figura 13:** Bandas de Mach, geradas pela imagem com gradiente de tons de cinza. As listras apontadas pelas setas são ilusões de óptica
- 114** **Figura 14:** Ilusão da grelha, gerada pelo processo de inibição lateral, surge nas intersecções de linhas verticais e horizontais
- 115** **Figura 15:** Exemplo de formação de imagem por uma lente convergente
- 116** **Figura 16:** Sombras coloridas obtidas a partir de três fontes luminosas, vermelho, verde e azul. Observa-se que as sombras apresentam as cores ciano, magenta e amarelo

SUMÁRIO

9	APRESENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL
10	Composição do material
10	Fundamentação teórica
11	Público-alvo e aplicabilidade
12	Estrutura do material
15	1 INTRODUÇÃO
19	2 A CONTRIBUIÇÃO DOS GREGOS: ÓPTICA COMO UMA TEORIA DA VISÃO
20	2.1 Introdução
23	2.2 O estudo da visão
24	2.3 O fogo visual
25	2.4 A perspectiva atomista
27	2.5 Platão
28	2.6 Aristóteles
30	2.7 Os Estoicos
31	2.8 Euclides
33	2.9 Ptolomeu
36	2.10 Análise epistemológica
41	3 A ÓPTICA MEDIEVAL, A RENASCENÇA E KEPLER
42	3.1 Introdução
44	3.2 Perspectiva
47	3.3 Kepler e a imagem na retina
52	3.4 Análise epistemológica
57	4 O PREDOMÍNIO DO MECANICISMO
58	4.1 Introdução
61	4.2 O Universo Mecânico de Descartes
62	4.2.1 A natureza da luz e sua propagação

SUMÁRIO

66	4.2.2 Os fenômenos de reflexão e refração
73	4.3 O Universo Mecânico de Newton
76	4.3.1 A Teoria da Luz e Cores de Newton
82	4.4 Análise epistemológica
87	5. ONDA, PARTÍCULA, ONDA-PARTÍCULA
88	5.1 Introdução
90	5.2 A unificação da óptica e do eletromagnetismo
92	5.3 A descoberta do efeito fotoelétrico
95	5.4 A solução de Planck para a radiação de corpo negro
97	5.5 A hipótese do quantum de luz
100	5.6 As ondas de matéria
101	5.7 Análise epistemológica
105	6. CONSIDERAÇÕES FINAIS
109	PROPOSTA DIDÁTICA PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL
110	Proposta didática na perspectiva histórico-cultural
111	Descrição dos encontros
117	Questionário
119	Guia para entrevista comentado
127	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
133	APÊNDICE A - Categorização epistemológica do conceito de luz
136	APÊNDICE B - Categorização ontológica do conceito de luz

APRESENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Este Produto Educacional está vinculado à tese de Doutorado *A história da óptica sob a perspectiva epistemológica de Bachelard: estudo de caso sobre os perfis epistemológicos de estudantes de um curso de Licenciatura em Física* (Pazim, 2025), desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade de Passo Fundo (UPF). O material está disponível para acesso público no site do programa e na plataforma Educapes: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/xxxxxx>.

O principal objetivo deste material é fornecer aos professores de cursos de Licenciatura em Física um recurso estruturado para identificar, compreender e promover a evolução dos perfis epistemológicos dos estudantes sobre conceitos de óptica. A proposta fundamenta-se na epistemologia de Bachelard e na teoria histórico-cultural de Vigotski, integrando ambas as abordagens para enriquecer a prática pedagógica.

Composição do material

O produto educacional consiste em uma proposta didática que inclui:

- ✓ **Uma Sequência Didática**, baseada na perspectiva histórico-cultural de Vigotski, para estruturar o ensino de óptica de forma dinâmica e interativa.
- ✓ **Um Texto de Apoio ao Professor**, que resgata a evolução histórica dos conceitos ópticos sob a ótica epistemológica de Bachelard, evidenciando os desafios superados ao longo da construção do conhecimento científico.
- ✓ **Instrumentos metodológicos** para investigar o perfil epistemológico dos estudantes e contribuir para sua evolução conceitual.

Fundamentação teórica

A epistemologia de **Bachelard** auxilia na compreensão dos processos de construção do conhecimento científico, com destaque para dois conceitos centrais:

- Obstáculos epistemológicos: barreiras internas ao próprio conhecimento que dificultam sua evolução, como a experiência primeira, o conhecimento geral, o obstáculo verbal, o substancialismo e o animismo.
- Perfis epistemológicos: representam o progresso do pensamento científico, que evolui de um **realismo ingênuo** até um **racionalismo discursivo**, permitindo a coexistência de diferentes concepções dentro de um mesmo indivíduo.

Já a **teoria histórico-cultural de Vigotski** fundamenta a Sequência Didática, enfatizando que a aprendizagem ocorre por meio da **internalização de instrumentos culturais e da mediação social**. Segundo Vigotski, a internalização de conceitos científicos não ocorre de forma espontânea, mas requer intervenções pedagógicas planejadas, explorando a **Zona de Desenvolvimento Iminente** do estudante. Essa abordagem possibilita a conexão entre conceitos espontâneos e científicos, promovendo uma compreensão mais profunda e integrada dos conteúdos.

A junção dessas duas perspectivas permite uma abordagem inovadora para o ensino de óptica, auxiliando professores na identificação e superação dos obstáculos epistemológicos dos estudantes.

PÚBLICO-ALVO e APLICABILIDADE

O material é voltado principalmente para professores de cursos de **Licenciatura em Física**, especialmente nas disciplinas de Óptica e Ensino de Física. Ele visa ampliar a compreensão epistemológica dos futuros docentes, permitindo que superem a mera transmissão técnica dos conteúdos e compreendam o processo histórico de construção do conhecimento científico.

Ao refletir sobre seus próprios obstáculos epistemológicos, o professor em formação se torna mais preparado para reconhecer as dificuldades conceituais de seus alunos.

Dessa forma, sua atuação pedagógica se torna mais consciente e eficaz, criando condições favoráveis para a superação das barreiras conceituais dos estudantes.

Entretanto, sua estrutura permite adaptações para outros contextos educacionais, como a **formação continuada de professores** e até mesmo o **Ensino Médio**, desde que sejam feitas adequações metodológicas para atender às especificidades de cada nível de ensino.

Para aqueles que desejam aplicar a **Sequência Didática** proposta, recomenda-se a consulta à tese completa, que oferece uma descrição detalhada dos encontros realizados, além de um aprofundamento teórico sobre Bachelard e Vigotski.

ESTRUTURA DO MATERIAL

O material está organizado em seis capítulos principais, seguidos da proposta didática e apêndices:

- ✂ **Capítulo 1** – Introdução ao tema e fundamentos epistemológicos da óptica.
- ✂ **Capítulo 2** – Contribuições gregas para a óptica.
- ✂ **Capítulo 3** – Óptica medieval e descobertas de Kepler.
- ✂ **Capítulo 4** – Mecanicismo nos séculos XVII e XVIII.
- ✂ **Capítulo 5** – Dualidade onda-partícula e o início da era quântica.
- ✂ **Capítulo 6** – Considerações finais.

Cada capítulo inclui uma **análise epistemológica**, destacando os obstáculos superados e as transformações do conhecimento em cada período.

Além disso, a seção Proposta Didática para Aplicação do Produto Educacional detalha:

- ☒ A Sequência Didática na perspectiva histórico-cultural.
- ☒ A descrição dos encontros.
- ☒ Um questionário para investigação das concepções dos estudantes.
- ☒ Um guia para entrevistas.

Por fim, os **apêndices** oferecem uma categorização epistemológica e ontológica do conceito de luz, fornecendo ferramentas para análise e compreensão da evolução conceitual dos estudantes.

1.

**INTRODUÇÃO
SOBRE A ABORDAGEM
HISTÓRICO-EPISTEMOLÓGICA
DA ÓPTICA**

Ao reconstruir o pensamento dos antigos, não precisamos buscar justificar suas crenças, seja assimilando nossas ideias às deles ou as deles às nossas. Mas o que sempre podemos fazer com proveito é descobrir como seria enfrentar as questões que eles enfrentaram e pensar como eles pensavam. (Sedley, 2003, p. 5).

Este Texto de Apoio ao Professor apresenta uma abordagem histórica e epistemológica da evolução dos conceitos da Óptica, desde suas origens na Antiguidade Clássica até o surgimento da teoria quântica no início do século XX. Adotando a epistemologia de Gaston Bachelard como referencial teórico, o trabalho analisa como o conhecimento sobre a luz e os fenômenos ópticos foi construído, modificado e reconstruído ao longo do tempo, evidenciando as rupturas epistemológicas e os obstáculos que precisaram ser superados. Para isso, será feita uma reconstrução histórica a partir de fontes secundárias (e primárias, quando possível).

A Óptica ocupa um lugar singular no desenvolvimento do pensamento científico. Sendo a visão considerada o mais nobre dos sentidos humanos, os fenômenos relacionados à percepção visual e à natureza da luz sempre despertaram profundo interesse. Como afirma Lindberg (1976, p. 1), “o mais nobre e confiável [dos sentidos] é a visão”, o que explica o esforço contínuo de filósofos e cientistas para compreender como as imagens são formadas e interpretadas pela mente humana.

Dessa forma, a escolha da epistemologia bachelardiana como fundamento teórico deste material revela-se especialmente pertinente. Para Bachelard, o desenvolvimento científico não ocorre de maneira linear e acumulativa, mas por meio de discontinuidades e rupturas. Sua teoria dos obstáculos epistemológicos permite identificar resistências históricas que dificultaram o avanço da compreensão sobre a natureza da luz. Como destaca Ferrer (2007, p. 8), a epistemologia de Bachelard é justificada pela história da ciência e construída a partir dela, possibilitando reconhecer obstáculos que “também podem ser percebidos na prática educativa contemporânea”.

O resgate histórico proposto neste trabalho não se limita a uma cronologia de descobertas, mas busca evidenciar as transformações na forma de pensar os fenômenos ópticos. Esta perspectiva alinha-se à teoria histórico-cultural, que reconhece que os conteúdos científicos não podem ser tratados como coisas mortas e desconectadas da realidade dos estudantes, “mas o conhecimento é atividade humana condensada e sua socialização traz à vida a atividade que ali se encontra em estado latente” (Duarte, 2021, p. 34).

A estrutura do texto reflete as principais etapas evolutivas do pensamento óptico, organizadas segundo as escolas filosóficas propostas por Bachelard: o período pré-científico (animismo e realismo/positivismo), representado pelas teorias gregas da visão; a transição para o período científico com Kepler (realismo/positivismo e racionalismo); o estabelecimento do racionalismo com a consolidação do mecanicismo; e finalmente a introdução da mecânica quântica na descrição da luz (ultrarracionalismo).

Ao acompanhar esta trajetória epistemológica, o leitor é convidado a reconhecer como cada nova concepção sobre a luz emergiu a partir da superação de obstáculos anteriores, em um processo de racionalidade crescente que caracteriza o desenvolvimento do espírito científico.

Por fim, ao término de cada capítulo, a seção “Análise Epistemológica” propõe uma reflexão crítica sobre o período abordado, destacando os obstáculos epistemológicos superados e as rupturas que possibilitaram o avanço do conhecimento. Dessa forma, busca-se não apenas promover o domínio conceitual da Óptica, mas também aprofundar a compreensão da dinâmica da construção científica. Além disso, procura-se oferecer subsídios para uma prática pedagógica mais crítica e fundamentada, bem como incentivar a reflexão sobre os caminhos do pensamento científico.

2.

A CONTRIBUIÇÃO DOS GREGOS: ÓPTICA COMO UMA TEORIA DA VISÃO

2.1 INTRODUÇÃO

A filosofia teve início no século VI a.C. com Tales de Mileto, na Grécia oriental, uma região que hoje corresponde à Turquia, situada a aproximadamente 200 km de Atenas pelo mar Egeu. Tales, Anaximandro e Anaxímenes, considerados os primeiros pensadores gregos, vivenciaram um período de prosperidade econômica, bem como liberdade política e cultural, o que lhes proporcionou tempo para especular sobre os fenômenos naturais, dando origem à chamada Filosofia da Natureza.

Até então, as explicações para os fenômenos da natureza eram fundamentadas no misticismo religioso, característica de povos como os egípcios, babilônicos e persas. A filosofia emergiu com o propósito de oferecer explicações lógico-rationais para esses fenômenos, caracterizando-se por ideias inovadoras e atitudes experimentais, marcando o início da ciência ocidental.

Durante esse período, desenvolveram-se diversas correntes de pensamento, incluindo os cosmólogos Jônicos (ou Milesianos), os Pitagóricos, os Eleatas, os atomistas e os sofistas.

Os Milesianos buscaram identificar o princípio material do qual tudo emerge. Tales atribuiu à água esse papel fundamental, argumentando que a terra repousa sobre ela, as sementes têm natureza úmida e o próprio alimento é úmido (Korczak, 2013). Anaximandro, por sua vez, propôs que a origem de todas as coisas era o apeiron, uma entidade infinita e sempre em movimento, que dá origem ao frio e ao calor, ao seco e ao molhado, e à constante transformação de um no outro, inclusive na existência de infinitos universos (Theodosiou et al, 2011). Já Anaxímenes escolheu o ἀήρ, que embora comumente traduzido como “ar”, foi por ele utilizado em um sentido mais amplo que pode ser interpretado como uma “névoa úmida opaca”. Ele atribuiu diferentes funções a cada significado: a névoa como uma substância geradora e o ar como suporte dos corpos celestes (Hobza, 2020).

Os Pitagóricos acreditavam no simbolismo dos números. Pitágoras foi o primeiro a utilizar a matemática para descrever o mundo natural. Um dos preceitos de Pitágoras era que os números eram as coisas mais sábias e os primeiros quatro números, a tetraktys (1, 2, 3 e 4), cuja soma é dez, é o número perfeito (Long, 1999).

Entre os Eleatas, Parmênides aprimorou um pensamento grego mais antigo, segundo o qual nada pode vir a ser do não ser, também conhecido como o paradoxo da mudança (Long, 1999). Para ele, o mundo verdadeiro era imutável e constante, enquanto as sensações e experiências são ilusões (Darrigol, 2012). Esse pensamento provocou dificuldades na explicação das transformações do mundo material.

Talvez como resposta ao paradoxo eleático, Empédocles aconselhou cautela na avaliação das evidências sensoriais, sem, contudo, rejeitá-las completamente. Ele propôs que o mundo material é composto por quatro raízes (rizômata): terra, água, ar e fogo. Comparou a natureza a um pintor que, ao misturar adequadamente seus pigmentos, consegue expressar as mais variadas cores e formas. Da mesma forma, a natureza, ao combinar as quatro raízes imutáveis em diferentes proporções, gera todo o universo (Long, 1999).

O atomismo de Leucipo e Demócrito surgiu como uma tentativa de reconciliar a imutabilidade proposta pelos Eleáticos com as observações da dinâmica realidade da matéria. Similarmente à proposta de Empédocles sobre raízes imutáveis que, ao serem misturadas, originam todas as coisas materiais, o atomismo apresenta uma ideia análoga com os átomos. Contudo, a distinção reside no fato de que os átomos são invisíveis, existem em infinitas formas e tamanhos, e suas propriedades individuais devem ser atribuídas teoricamente, ao contrário de elementos como o fogo ou a água, cujas propriedades podem ser diretamente percebidas pelos sentidos.

O acordo com os Eleáticos reside na concepção de que os átomos são imutáveis, mas as variações no que vemos e sentimos decorrem de diferentes agregações desses átomos. A noção de vazio é introduzida para explicar a possibilidade de movimento e também para justificar a imutabilidade do átomo, que não contém vazio interno.

Eles acreditavam, então, que o universo consistia de uma coleção infinitamente grande de objetos físicos indivisíveis (átomos) movendo-se num espaço infinito, onde espaço é um continuum tridimensional no qual qualquer parte poderia ser ocupada ou desocupada. (Long, 1999, p. 184)

Platão não desenvolve um conceito específico de matéria e enfatiza que a alma é mais importante que o corpo, defendendo que o cosmos é regido por uma alma dotada de intelecto, racionalidade e divindade (Van Riel, 2020). Nesse sentido, Deus é entendido como pura racionalidade (Sedley, 2003). Alexander (1918, p. 14) observa sobre Platão: “Para ele, a ciência empírica é uma obra de arte humana, assim como o universo empírico é a obra de arte de Deus”. Platão distingue a criação divina, que é a verdade, da criação humana, limitada pela corporeidade.

Embora não estivesse preso à necessidade de explicar o mundo material e corpóreo, Platão articulou as doutrinas da matéria de seus predecessores: os elementos de Empédocles são transformados em átomos que se organizam espacialmente segundo os princípios matemáticos de Pitágoras (Darrigol, 2012). O exemplo a seguir é esclarecedor:

Assim, a forma do elemento fogo é a pirâmide, do ar o octaedro, da água o icosaedro, da terra o cubo. O quinto sólido, o dodecaedro é a forma do universo como um todo, ou talvez se possa dizer o andaime sobre o qual o universo esférico é construído. Além disso, esses elementos são compostos de formas matemáticas mais simples, a pirâmide, o octaedro e o icosaedro do escaleno, o cubo dos triângulos equiláteros; de modo que, se considerarmos os elementos como moléculas, podemos ver os triângulos como átomos do substrato material. (Alexander, 1918, p. 18).

Aristóteles foi um aluno proeminente da escola de Platão, a Academia. Após a morte de seu mestre, mudou-se para o noroeste, para Assos, onde se casou e teve dois filhos. Recebeu o convite para ser tutor do então herdeiro do trono macedônico, Alexandre, o Grande. Cumprida sua missão, com Alexandre já como rei, Aristóteles retornou a Atenas e fundou sua própria escola, o Liceu.

Embora educado na filosofia de Platão, Aristóteles rejeitou algumas de suas teses e focou mais nas questões do mundo material, em contraste com o enfoque de seu mestre. Como destaca Sedley (2003, p. 132): “Aristóteles forneceu relatos detalhados, sistematicamente desenvolvidos e implantados do mundo físico sensível e de nossa vida dentro dele, que haviam sido negligenciados pelo próprio Platão”.

2.2 O ESTUDO DA VISÃO

O uso dos sentidos para a percepção da realidade foi tratado de maneiras diversas pelos filósofos gregos: os Milesianos os aceitaram, os Eleáticos os rejeitaram, enquanto os demais optaram por aceitá-los com cautela.

Lindberg (1976, p. 1) ressalta que, entre os cinco sentidos humanos, “o mais nobre e confiável é a visão”. Isso fica evidente ao analisar fenômenos ópticos como o arco-íris, que impactam a humanidade desde que se começou a observar o céu. A oftalmologia, parte dos estudos dos egípcios, era bem estabelecida na Grécia antiga por Hipócrates. Outro indicativo é o esforço contínuo dos filósofos gregos, ao longo de séculos, para entender como as imagens penetram em nossa mente e explicar geometricamente a nossa percepção do espaço.

Cada um dos principais filósofos gregos, motivados pela relevância do tema, desenvolveu alguma teoria relacionada aos fenômenos ópticos, tratados como estudos da visão. Nestas teorias, a luz desempenhava um papel secundário, fazendo com que a óptica grega não fosse uma teoria da luz, mas predominantemente uma teoria da forma como o olho interage com os objetos visualizados. Smith (2018, p. 413) esclarece esse aspecto, explicando que “o objetivo da óptica grega era explicar a visão, não a física da luz, de modo que o raio clássico representava um caminho para a visão, não para a luz”.

Outra característica marcante da óptica grega era a rejeição da ação à distância, o que gerava a necessidade de algum tipo de contato, literal ou metafórico, entre o objeto e o olho do observador. Darrigol (2012) categoriza as teorias da visão gregas da seguinte forma:

- i. Atomistas: acreditavam na emissão de partículas do objeto até o olho;
- ii. Teóricos do meio: propunham a existência de um meio inerte entre o objeto e o olho;
- iii. Platão e os Estoicos: defendiam que a sensibilidade do olho se estende até o objeto e retorna ao olho para formar a imagem na mente.

Squire (2016) oferece uma classificação alternativa, porém igualmente elucidativa, baseada nos conceitos opostos de “extromissionismo” e “intromissionismo”:

- i. As teorias extromissionistas são aquelas que propõem a emissão de raios de fogo do olho em direção ao objeto;
- ii. No outro extremo, as teorias intromissionistas propõem que os objetos emitam simulacros (réplicas ou eidolas) que imprimem a imagem nos olhos. Nesta categoria se enquadram os atomistas;
- iii. Entre os dois extremos, situam-se as teorias que contemplam um meio sensitivo, podendo ser chamadas de “interacionistas”. Platão e os Estoicos estão incluídos nesta categoria.

Independente da categorização adotada, é importante reconhecer que as diversas explicações gregas para os fenômenos da visão competiam entre si, e cada uma delas enfrentou desafios teóricos significativos.

2.3 O FOGO VISUAL

Se houve uma preferência popular grega por alguma teoria da visão, essa foi a do fogo visual (Squire, 2016; Darrigol, 2012). Essa teoria propunha que o olho emitia um raio de luz que inspecionava o objeto a ser visualizado. A popularidade dessa crença era tão ampla que ela aparece em poesias e peças de teatro, mesmo antes do surgimento da filosofia.

Na *Iliada*, de Homero, escrita no século VIII a.C., encontramos o seguinte trecho (Homer, 2021, s.p.): “Juno, você não precisa ter medo de que deus ou homem a veja, pois eu envolverei nós dois em uma nuvem dourada tão densa que o próprio sol, com todos os seus raios brilhantes e penetrantes, não enxergará através dela”.

O astrônomo grego Hiparco descreveu o olho como uma “mão visual” (Squire, 2016, p. 17). Téon de Alexandria argumentava a favor da existência do fogo visual pela necessidade de se concentrar ao observar objetos pequenos, como uma agulha no chão (Darrigol, 2012). Alcmeão de Crotona, médico grego e um dos mais importantes discípulos de Pitágoras, afirmava que a existência do fogo ocular é comprovada pelo fato de que um golpe no olho provoca sensações visuais, como faíscas (Darrigol, 2012).

Empédocles, que também adotava a perspectiva do fogo visual, escreveu o seguinte poema (Darrigol, 2012, p. 3):

Assim como um homem, ao pensar em sair em uma noite de inverno, prepara uma luz, uma chama de fogo ardente, colocando em volta dela uma lanterna para afastar todo tipo de vento; divide as rajadas dos ventos impetuosos, mas a luz, a substância mais sutil, atravessa e brilha no umbral com raios inflexíveis; então, naquele momento [quando Afrodite criou os olhos], o fogo primordial, envolvido em membranas, deu origem à pupila redonda em suas delicadas vestes que são perfuradas por canais maravilhosos. Estes mantêm a água que envolve a pupila afastada, mas permitem a passagem do fogo, a parte mais fina.

A comparação do fogo visual com chamas de fogo ou com o fogo proveniente do sol, feita por Empédocles, não é casual. Ele acreditava que a presença desses dois tipos de fogo era essencial para o funcionamento da visão.

2.4 A PERSPECTIVA ATOMISTA

Os atomistas foram um dos primeiros grupos a propor uma explicação para a visão. Sua teoria baseia-se em duas condições importantes: a primeira é que existe uma emanção material do objeto, uma fina camada de átomos que funciona como um simulacro (duplicata); a segunda é a necessidade de contato dessa emanção com o olho.

Algumas curiosidades sobre a emanção material do objeto incluem:

i. A emissão é contínua e o objeto não perde massa, pois outras partículas assumem o lugar daquelas que foram emitidas. Ao chegarem no objeto, elas fazem parte dele tempo suficiente para carregar sua forma quando forem emitidas;

ii. A emissão é comparada com a casca da cigarra que é abandonada durante a muda;

iii. A emissão pode perder sua forma durante o trajeto até o olho, pois pode sofrer perturbações externas do meio. Isso pode explicar por que objetos distantes não são vistos claramente.

Entretanto, essa descrição pode ser uma forma simplificada de resumir as diversas teorias atomistas para explicar a visão. Uma abordagem mais imparcial seria contextualizar essas teorias no âmbito do fogo visual, então a perspectiva mais popular, e analisar as teorias que buscavam conciliar-se com as teorias do fogo visual e aquelas que propunham um rompimento com elas.

Teofrasto (sucessor de Aristóteles), Empédocles e Demócrito defendiam a ideia de que o fogo visual encontra a emissão material para gerar a percepção visual. Empédocles, em especial, afirmava que se via, pois a luz saía do olho, mas também que as emissões deveriam entrar pelos poros do olho para serem percebidas. Essas são afirmações aparentemente contraditórias, e algumas interpretações modernas variam entre concordar que são ideias irreconciliáveis ou que Empédocles assumia que o olho deveria possuir fogo interno, a fim de perceber as imagens que entrassem nele (Lindberg, 1976).

Epicuro e Lucrécio, discípulos de Demócrito, propuseram o abandono da ideia do fogo visual. Para eles, todas as características do objeto estariam presentes na emissão (efígies, simulacros) que atinge os olhos. O molde formado pelo conjunto de átomos da efígie transporta a informação da forma do objeto, enquanto o arranjo interno dos átomos da efígie contém a informação sobre as cores.

Esta teoria é um pouco mais elaborada do que a de seus predecessores atomistas, entretanto ainda precisava esclarecer as seguintes questões:

i. Por que é necessária a presença de iluminação para tornar os objetos visíveis, se a efígie já continha todas as informações sobre o objeto?

ii. Como a efígie de um objeto grande seria capaz de entrar no olho?

A resposta ao primeiro desafio introduziu um novo elemento na teoria: o ar, ou os átomos de ar. Na ausência de átomos de luz do Sol ou de chamas, os átomos de ar impedem a passagem da efígie. Assim, os átomos de luz tornariam o meio “permeável” às efígies, criando espécies de poros no ar. Dessa forma, torna-se necessária a presença tanto de luz quanto das efígies materiais para viabilizar a visão.

Quanto à segunda questão, a resposta também é inovadora: não seria a efígie completa, do tamanho real do objeto observado, que entraria no olho, mas apenas parte dela. Este fragmento conteria a informação completa (forma e cores) do objeto original.

2.5 PLATÃO

Platão elevou o conceito de fogo visual ao seu máximo desenvolvimento, integrando as abordagens de Aristóteles, Empédocles e Demócrito. Sua contribuição significativa foi a formulação do conceito de corpo, definido como a união do fogo que emana do interior do olho com o fogo proveniente do sol ou de outra fonte luminosa.

Platão utiliza a palavra “raio” para referir-se tanto ao fogo visual que parte do olho quanto à luz diurna, pois ambos compartilham a mesma essência. Seguindo um princípio de Empédocles, de que semelhante interage com semelhante, o olho deve conter fogo visual, elemento da mesma natureza da luz solar ou das chamas, para que possa percebê-los.

Esta coalescência, ou raio visual único e homogêneo, se forma em linha reta entre o olho e o objeto observado e, além disso, esse corpo é percipiente, pois “[...] transmite os movimentos de qualquer coisa com que entra em contato ou que entra em contato com ele, através de todo o corpo, até a alma, e assim provoca a sensação que chamamos de ver” (Cornford, 1997, p. 153). Portanto, o corpo funciona como o meio material (visão atomista) através do qual o movimento é transmitido até os olhos e a alma, e essa transmissão pode ser considerada um terceiro fogo (corrente visual).

Este movimento, por sua vez, possui diversas qualidades que permitem transmitir as diferentes características dos objetos observados (Darrigol, 2012):

i. Branco e preto: Partículas de diferentes tamanhos e velocidades, emitidas pelos objetos (efígies), estão associadas à sensação de branco e preto. O fluxo da corrente visual contém suas próprias partículas; quando as partículas emitidas pelo objeto são maiores, cria-se a sensação de branco; quando são menores, de preto; e quando são do mesmo tamanho, de transparência;

ii. Brilho e cores: A intensidade do brilho é maior quanto maior a velocidade das partículas, e as cores surgem de diferentes combinações entre a corrente visual e as partículas da efígie.

2.6 ARISTÓTELES

Aristóteles foi o primeiro a sistematizar o estudo da visão, definindo cuidadosamente os conceitos relevantes e elaborando sua teoria a partir deles. Até então, as perspectivas sobre a visão de outros filósofos estavam dispersas em diversos textos dedicados a outros temas principais. Sua sistematização também provocou críticas severas, refletindo um espírito de rejeição às teorias de seus antecessores. Reprovando qualquer vertente atomista e a concepção mais comum entre o povo e estudiosos da época, o fogo visual, Aristóteles fundamentou grande parte do seu estudo da visão ao responder às dificuldades lógicas que as teorias anteriores enfrentavam.

Alguns exemplos dos argumentos de Aristóteles contra as ideias de seus antecessores podem ser encontrados em seu tratado *Da Alma* (escrito no século IV a.C.). Ele define os conceitos de luz e transparência e conclui negando explicitamente a natureza corpuscular da luz, como defendida pelos atomistas, e também a ideia do fogo visual. Aristóteles descreve: “Descrevemos assim o que são a luz e a transparência, que não são nem fogo, nem em geral qualquer corpo, nem a emanção de qualquer corpo (pois nesse caso eles próprios seriam um corpo de algum tipo (...))” (Aristóteles, 1935, p. 105).

Aristóteles também critica um absurdo da teoria atomista, segundo a qual, se o espaço entre o observador e o objeto estivesse vazio, seria possível ter uma visão perfeita de qualquer objeto distante, uma vez que as efígies materiais viajariam todo o trajeto sem perturbações causadas pelo ar, vento, umidade ou poeira. Sobre isso, Aristóteles afirma: “Demócrito se engana ao pensar que, se o meio estivesse vazio, até mesmo uma formiga no céu seria claramente visível; pois isso é impossível” (Aristóteles, 1935, p. 107).

No seu *Parva Naturalia* (escrito no século IV a.C.), Aristóteles critica duramente as teorias baseadas no fogo visual e sua coalescência com a luz externa ao olho:

Mas, em geral, não é razoável supor que a visão como visão ocorre por algo que sai do olho e chega até as estrelas, ou que chega a um certo ponto e ali se funde com o objeto, como alguns pensam. Seria melhor supor que a coalescência ocorre no olho, para começar. Mas mesmo isso é tolice; qual é o significado da luz se fundindo com a luz? Como poderia ocorrer? Pois a coalescência do acaso é impossível. E como poderia o interior fundir-se com o exterior? (Aristotle, 1935, p. 219).

Entretanto, Aristóteles não descartou tudo o que o precedeu. A ideia principal da sua teoria da visão foi emprestada de Platão, referente à existência de um meio homogêneo entre o olho e o objeto observado. Este meio é tão crucial que a visão não seria possível através de um espaço vazio, nem com objetos justapostos ao olho. Ele seria o éter celestial, um material transparente que preenche em grande proporção o ar, a água e outros sólidos similares, e também, em menores proporções, qualquer outro corpo. O éter, portanto, é responsável por transferir as qualidades do objeto até o olho do observador.

Ao abandonar as efígies e a coalescência do fogo visual com a luz do sol, Aristóteles precisou explicar por que não se vê no escuro. Sua proposta, considerada brilhante, baseia-se nas propriedades de transparência do meio homogêneo. A transparência é o potencial que o meio possui para transmitir as propriedades do que se deseja ver, como cores e formas. No entanto, é necessária luz para ativar esse potencial de transparência do meio. Quando o meio, como o ar ou a água, é exposto à luz, ele se torna transparente

simultaneamente em toda a sua extensão. Aristóteles considerava esse processo de atualização da transparência e transporte das informações do objeto como instantâneos e sem necessidade de movimento do meio, pois envolviam apenas mudanças qualitativas.

Neste sentido, a luz é definida como o estado do meio no qual a transparência está ativada. As cores¹ seriam o ímpeto natural dos objetos para induzir mudanças qualitativas no meio, que são então comunicadas ao observador (Lindberg, 1976). De forma mais simples, segundo Aristóteles, o objeto da visão são as cores transmitidas do objeto ao olho através do meio.

2.7 OS ESTOICOS

O Estoicismo, fundado por Zenão de Cítio, faz parte do período Helenístico (323 a.C. até 30 a.C.) da filosofia grega. Tornou-se tão popular que seus princípios eram conhecidos desde os altos círculos dos imperadores romanos até os níveis dos escravos (Sedley, 2003). Sua teoria da visão está relacionada com o conceito de pneuma, uma mistura de ar e fogo que permeia todo o universo, sendo responsável pela coesão e pelas combinações da matéria, sustentando o mundo.

Este pneuma óptico partiria do centro de consciência do cérebro em direção ao olho, colocando o ar imediatamente próximo ao olho em estado de tensão. Na presença da luz do sol (fogo), tornar-se-ia um instrumento da visão diretamente conectado à alma do observador e em contato com os objetos a serem observados. É importante notar que Platão, Aristóteles e os estoicos estabeleceram suas teorias da visão baseando-se em um meio específico que transmitiria as mudanças qualitativas geradas pelo objeto observado até o olho do observador (Lindberg, 1976).

Esse meio especial dos Estoicos pode ser comparado a um cego tateando o chão com sua bengala. Alexandre de Afrodísias, que não era estoico, mas sim o maior comentador dos trabalhos de Aristóteles, resumiu este aspecto da teoria da seguinte maneira:

.....

1 - Para Aristóteles, as cores eram uma mistura entre luz e sombra.

Algumas pessoas explicam a visão pela tensão do ar. O ar adjacente à pupila é excitado pela visão e formado em um cone que é estampado em sua base por uma impressão do objeto da visão e, assim, a percepção é criada semelhante ao toque de um bastão. (citado em Lindberg, 1976, p.9).

A ideia do bastão foi criticada pelo médico e filósofo greco-romano Galeno de Pérgamo, que argumentou que não seria possível transmitir cores, tamanho e posição por esse meio. Mantendo a ideia do pneuma estoico, Galeno substituiu a analogia do bastão por um tentáculo de polvo, que é enervado e capaz de transmitir diversas qualidades, dependendo apenas da pressão transmitida pelo bastão. Quanto à crítica de Aristóteles, de que o fogo visual (e, por extensão, o pneuma) não poderia alcançar objetos tão distantes quanto as estrelas, Galeno declarou que a tensão gerada no ar ocorre somente no entorno do olho.

2.8 EUCLIDES

Os estudos da visão realizados pelos filósofos citados até aqui são essencialmente qualitativos. A partir deles, não é possível determinar exatamente como as imagens são vistas. Entretanto, pode-se supor que a antiga e popular ideia do fogo visual tenha servido como precursora de uma óptica geométrica, pois o observador teria consciência dos trajetos dos raios emitidos por seus olhos e poderia acompanhar suas trajetórias após o contato com os objetos, criando assim a percepção da visão. Portanto, a inovação de Euclides reside em sua óptica geométrica, que aplica a geometria euclidiana à óptica, excluindo sistematicamente fundamentos físicos e discussões sobre as cores. Esta abordagem foca em linhas retas visuais em vez de raios visuais.

O tratado de óptica de Euclides (escrito em 300 a.C.), ou “Óptica” de Euclides (2013), possui sete definições que fundamentam 58 proposições. Essas definições levam em conta as diferentes proporções de comprimentos a distintas distâncias do olho, bem como diferentes ângulos em relação ao eixo da visão e são as seguintes:

i. Seja suposto que linhas retas traçadas a partir do olho atravessam uma distância de grande magnitude.

ii. E que a figura formada pelos raios visuais é um cone, cujo vértice está no olho e a base nas extremidades daquilo que é visto.

iii. E que aquilo sobre o qual os raios visuais incidem é visto, e aquilo sobre o qual os raios visuais não incidem não é visto.

iv. E que, a partir de um ângulo maior, aquilo que é visto aparece maior; a partir de um menor, aparece menor; e a partir de ângulos de visão iguais, aparece igual.

v. E que, a partir de raios visuais mais altos, aquilo que é visto aparece mais alto; a partir de raios visuais mais baixos, aparece mais baixo.

vi. E, similarmente, que, a partir de raios visuais mais à direita, aquilo que é visto aparece mais à direita; a partir de raios visuais mais à esquerda, aparece mais à esquerda.

vii. Enfim, que, a partir de um maior número de ângulos, aquilo que é visto aparece mais distintamente.

Nas três primeiras definições, assume-se que os raios visuais, que partem do olho em linhas retas², formam e preenchem o volume de um cone. O vértice deste cone está localizado dentro do olho e sua base, sobre o objeto observado. Para que um objeto seja visto, é necessário que ele cruze o volume desse cone. Portanto, a retilinearidade dos raios é um elemento essencial para a aplicação da geometria euclidiana no processo da visão. Na primeira definição, Euclides estabelece isso e, nas segunda e terceira definições, identifica quais raios são relevantes para o processo.

As definições de quatro a seis tratam da distribuição angular dos raios visuais dentro do cone. O tamanho aparente do objeto é proporcional à separação angular dos raios que o contêm, e a posição do objeto na base do cone também é percebida pelo observador. Isso confere a noção de baixo, cima, direita e esquerda em relação ao observador que, supostamente, está olhando diretamente à frente.

.....

2 - Mesmo que haja uma correspondência exata entre “raios visuais” e “raios de luz”, Rodrigues Neto (2013) esclarece que Euclides assume em seu tratado o estudo de “linhas retas visuais”, as quais são suficientes para realizar o tratamento geométrico da visão. Entretanto, essa diferença conceitual é fundamental para compreender as questões abarcadas nas teorias da visão gregas.

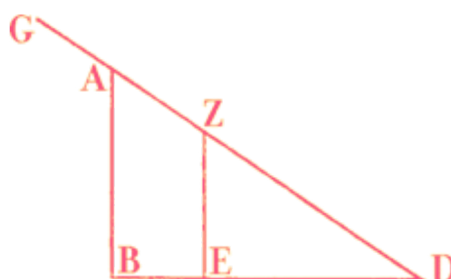
A sétima definição se distingue das seis anteriores, que definem a perspectiva angular. Euclides agora enuncia que os raios visuais existem em número finito (distribuição angular discreta), e, devido a isso, a definição de um objeto depende da quantidade de raios visuais que inspecionam sua superfície. Assim, na Óptica de Euclides:

i. O olho é uma parte ativa do processo da visão, de onde partem os raios visuais que sondam os objetos. Isso pode indicar uma concordância de Euclides com Platão;

ii. Devido à distribuição discreta dos raios visuais, um objeto será invisível se estiver localizado entre dois raios adjacentes. Essa noção explícita sobre o que pode ser visível ou invisível é um raro aspecto físico da visão na obra de Euclides;

iii. A proposição 18 é um caso especial, onde um raio de luz solar substitui um raio visual. O objetivo é resolver um problema de altimetria por semelhança de triângulos, e o diagrama utilizado por Euclides pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Diagrama utilizado por Euclides para demonstrar a proposição 18. GD é um raio de luz solar, EZ, DE e DB são conhecidos, deseja-se encontrar a altura BA



Fonte: Euclides, 2013, p. 902

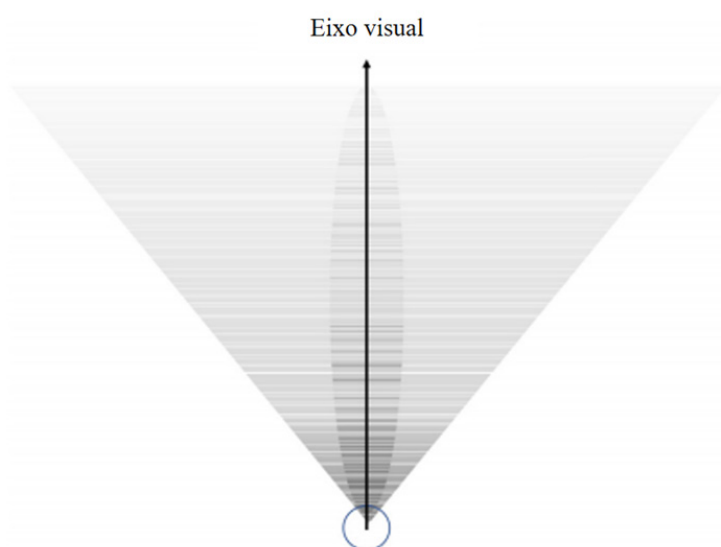
2.9 PTOLOMEU

Enquanto Euclides foi o autor do primeiro estudo matemático da visão, Ptolomeu pode ser considerado o primeiro grande experimentador, ao aprimorar os estudos de Euclides por meio de diversos recursos experimentais (Webster, 2022). Ptolomeu, como era comum na época, não se restringia a uma única escola filosófica. Em vez disso, ado-

tava uma abordagem sincrética, buscando conciliar diferentes correntes de pensamento. (Taub, 1993). Isso é evidenciado em sua óptica, onde adota o pneuma estóico como uma base conceitual, embora não se limite a ele. Ainda é incerto se Ptolomeu acreditava num cone visual senciente, conforme o pneuma estóico, ou se via o meio apenas como um transmissor de informações ao observador (Lindberg, 1976).

Diagramas de raios visuais foram utilizados tanto por Euclides quanto por Ptolomeu. Enquanto o primeiro acreditava na realidade física e discreta dos raios, o segundo os empregava nos diagramas geométricos como uma abstração útil para demonstrações matemáticas, pois não acreditava na sua realidade física. A óptica de Ptolomeu também se diferencia da euclidiana quanto à definição dos objetos observados, que não mais dependia da quantidade de raios visuais que incidem sobre ele, conforme afirmava Euclides, mas sim da força do raio visual. Essa força é proporcional à concentração do feixe em torno do eixo visual e à distância até o objeto, conforme ilustra a Figura 2. O eixo visual coincide com a altura do cone visual, e na Óptica de Ptolomeu, o olho emite um cone de raios visuais contínuos que permite a percepção do objeto e ressalta a inomogeneidade do feixe.

Figura 2: Concepção de Ptolomeu sobre a acuidade visual. A região mais escura próxima ao eixo de visão possui acuidade maior



Fonte: Webster, 2022, p. 194

Nesse contexto, Ptolomeu utiliza ainda a analogia do fluxo visual, comparando o pneuma a um conjunto dinâmico de partículas que podem se chocar, ricochetear e interagir com o ar, perdendo sua velocidade e intensidade ao percorrer grandes distâncias. Essa descrição também serve para explicar os ângulos iguais de incidência e reflexão da luz e a perda de qualidade da imagem de um objeto distante ou de seu reflexo em um espelho (Webster, 2022). A metáfora da dinâmica do fluxo visual é entendida fisicamente como transporte de energia, fornecida ao fluxo pelo observador e transferida ao meio, como o ar, o vidro ou a água, atravessando-o ou sendo refletido por ele. Essa transferência de energia ao meio resulta na perda de qualidade da imagem (Lindberg, 1976).

Influenciado diretamente pelos resultados de experimentos que ele mesmo desenhou, executou e interpretou, Ptolomeu propôs questões que não haviam sido abordadas por outros tratados de óptica até então. Webster (2022) aponta que as ferramentas que Ptolomeu utilizou para investigar a visão influenciaram significativamente suas teorias mais amplas sobre o assunto. Entre seus principais instrumentos estavam a régua de Ptolomeu e o disco de bronze, que inspiraram respectivamente: a) a existência de um “eixo comum” entre os dois cones visuais, coincidentemente na mesma posição em que Ptolomeu posicionava sua régua; b) a localização da visão no centro geométrico do olho, fazendo uma clara analogia entre a geometria do olho e do disco de bronze (Webster, 2022).

No campo das cores e da importância da luz do Sol, ou luminosidade, pouco avanço foi proposto por Ptolomeu. Seguindo o pensamento de Aristóteles, ele afirma que as cores são uma característica do objeto que modifica o cone visual, sendo percebida pelo observador. Essa modificação (*passio*³) permite perceber, além das cores, os formatos dos objetos. Sobre a luminosidade, Ptolomeu declara: “a cor precisa da luz para torná-la realmente visível” (Smith, 1996, p. 75).

3 - *Passio* faz parte do cânone das categorias aristotélicas que modificam indiretamente o sujeito ou a substância. (Universal Encyclopedia of Philosophy <http://www.ptta.pl/pef/index.php?id=hasla_a&lang=en>)

2.10 ANÁLISE EPISTEMOLÓGICA

Em sua obra *A Formação do Espírito Científico*, Bachelard (2005) categoriza a Antiguidade Clássica dentro do primeiro período das três diferentes etapas históricas do pensamento científico. Este período, que representa o estado pré-científico, se estende até o século XVIII.

O segundo período, que representa o estado científico, em preparação no fim do século XVIII, se estenderia por todo o século XIX e início do século XX. Em terceiro lugar, consideraríamos o ano de 1905 como o início da era do novo espírito científico [...]. (Bachelard, 2005, p. 9).

Portanto, as teorias da visão gregas, conforme Bachelard, caracterizam-se como pré-científicas e há diversos pontos que justificam seu estágio de desenvolvimento. Em *A Formação*, são apontados os obstáculos epistemológicos que a mente humana deve superar para se tornar científica (Chimisso, 2016).

No Quadro 1, está um resumo dos obstáculos epistemológicos propostos por Bachelard (2005). Em seguida, identificaremos onde alguns destes obstáculos epistemológicos estiveram presentes nas teorias gregas da visão.

Quadro 1: Resumo dos obstáculos epistemológicos propostos por Bachelard (2005)

OBSTÁCULO EPISTEMOLÓGICO	Definição
1. A experiência primeira	Surge do primeiro contato com a natureza. A percepção dos fenômenos pelos sentidos é tão real, natural e concreta que se estabelece como verdade.
2. O conhecimento geral ou da adesão apressada a um conhecimento geral	O ardil das leis gerais está em definirem palavras e não coisas. Utilizando palavras simples de conhecimento geral, o fenômeno é descrito e, estando descrito, parece compreendido.
3. O obstáculo verbal	A metáfora transforma-se na explicação do fenômeno, consequentemente balizando experimentos e ideias posteriores. O uso desse recurso é uma forma de recorrer ao concreto, quando uma explicação objetiva demandaria abstração e linguagem matemática.

4. O conhecimento unitário e pragmático	Funda-se nos conceitos de perfeição e unidade da natureza. A partir deles, derivam-se adjetivos dos mais variados como puro, limpo, constante. Estes conceitos e adjetivos guiam tanto premissas quanto conclusões.
5. O obstáculo substancialista	Estudando uma substância, pode-se tentar atribuir-lhe diversas qualidades internas, sob a perspectiva de que “a substância é o seu interior”.
6. O obstáculo animista	A intuição da vida domina as explicações de fenômenos não diretamente relacionados a ela.

Ação POR CONTATO

Uma característica importante da óptica grega era a ausência de ação à distância, caracterizando-se por um aspecto psicologicamente concreto. Independentemente da linha filosófica adotada, prevalecia alguma forma de contato para estabelecer a visão. Não há críticas a esse aspecto. Essa necessidade de contato para a percepção pode ter surgido como uma extensão da explicação de um sentido, o tato, para outro, a visão. Isso ocorre porque a intuição do concreto predominava e se generalizava, exemplificando, assim, o obstáculo geral.

O FOGO VISUAL

A óptica grega, como aqui denominada, não constitui uma teoria física da luz, embora em diversos momentos trate disso de forma indireta. Trata-se, antes, de uma teoria da visão e, sob a perspectiva da óptica moderna, “o raio clássico representava um caminho para a visão, não para a luz” (Smith, 2018). No entanto, sob uma abordagem geométrica, a óptica grega também contribuiu para o desenvolvimento de teorias sobre raios luminosos, como as propostas por Euclides e Ptolomeu.

O conceito de fogo visual, primeira expressão da óptica grega, surgiu espontaneamente na sociedade grega, estando profundamente enraizado em sua cultura. Por essa razão, foi quase unanimemente adotado pelas principais escolas filosóficas da época, estando na origem de diversos obstáculos epistemológicos.

Alcmeão de Crotona apresenta como evidência da existência do fogo visual dentro do olho, o fato de que um golpe neste órgão pode provocar sensações visuais, como faíscas ou clarões⁴ (Darrigol, 2012). Para aqueles que já vivenciaram esse fenômeno, não há dúvidas sobre sua natureza luminosa, ilustrando assim o obstáculo epistemológico da experiência primeira.

A escolha da palavra “fogo” por Empédocles para descrever a visão é um exemplo de obstáculo verbal. Ele compara o fogo visual a chamas ou à luz do sol e, em um poema, narra como Afrodite, ao criar os olhos humanos, aprisionou o fogo primordial dentro deles.

Sob a perspectiva do obstáculo do conhecimento unitário, é possível reconhecer uma harmonia entre o fogo visual ocular e a iluminação proveniente do Sol ou de outras fontes luminosas. Essa conexão pode ser expandida para incluir o princípio de unidade da natureza, que pressupõe que a interação ocorre entre elementos semelhantes, como fogo com fogo.

Pneuma estoico

Inicialmente, o pneuma estoico é comparado a um cego tateando o ambiente com uma bengala; posteriormente, é comparado a tentáculos de polvo, visando ampliar a percepção das diversas qualidades do objeto visualizado. Estes são exemplos do obstáculo verbal. Sob esta perspectiva, o astrônomo grego Hiparco descreveu o olho como uma “mão visual” (Squire, 2016, p. 17). Sugerindo que o pneuma, integrando um só corpo, tem sua origem no centro de percepção da visão humana, parte do *hêgemonikon*, Galeno afirma que “o olho tem a mesma relação com o ar como o cérebro tem com os nervos” (Darrigol, 2012, p. 8), atribuindo uma propriedade sensível tipicamente humana ao pneuma, o que exemplifica o obstáculo animista.

4 - Em inglês, *flashes*.

Efígies atomistas

As efígies são a proposta atomista para superar o conceito de fogo visual. Entretanto, havia dificuldades em explicar a necessidade de iluminação para tornar os objetos visíveis. A solução encontrada foi, conforme Bachelard diria, recorrer à física da esponja. Especificamente, recorreu-se à “esponjosidade” do ar: os átomos de luz, abrindo espécies de poros no ar, tornariam o meio “permeável” às efígies. Soluciona-se assim o problema da iluminação e abraça-se o obstáculo verbal.

Com espessura muito fina, de alguns átomos, e tamanho igual ao do objeto que a emitiu, as efígies de objetos grandes encontravam problemas para passar pela entrada, pequena, do olho. O obstáculo substancialista surge aqui, ao tratar a efígie como uma espécie de substância visual, afirma-se que apenas parte dela, de tamanho suficiente para entrar no olho, carrega as informações completas do objeto que lhe deu origem.

Éter celestial

Aristóteles propõe o éter celestial como substância/meio intermediador para a visão. Esta substância possui várias propriedades, exemplificando o obstáculo substancialista: (i) é transparente; (ii) preenche em grande proporção o ar, a água e outros sólidos similares, e também, em menores proporções, qualquer outro corpo; (iii) permite a transmissão das propriedades do que se quer ver, como cores e formas; (iv) quando exposto à luz, todo ele, ao mesmo tempo, torna-se transparente; (v) permite a transmissão instantânea das informações.

3.

A ÓPTICA MEDIEVAL, A RENASCENÇA E KEPLER

3.1 INTRODUÇÃO

O período medieval, compreendido entre os séculos V e XV, avançou pouco em relação ao conhecimento óptico produzido pelos gregos, especialmente na superação de obstáculos epistemológicos. Este período foi marcado por um esforço significativo de tradução e assimilação sistemática do conhecimento óptico grego pelo império árabe, impulsionado pela “ênfase do Alcorão no conhecimento de Deus baseado na observação” (Darrigol, 2012, p. 16). Os árabes foram pioneiros na preservação e transmissão desse saber até os dias atuais, com destacados estudiosos como al-Kindi, al-Razi, al-Farabi, Avicena e Alhazém.

Al-Kindi aprofundou-se na obra de Euclides e forneceu várias justificativas para o caráter extromissionista da visão, concordando com Euclides. Entre suas contribuições, destacam-se dois aspectos principais. Primeiro, ele abordou a retilinearidade dos raios luminosos, um axioma proposto pelo grego, que al-Kindi comprovou experimentalmente utilizando sombras de placas opacas. Segundo, ele expressou discordância em relação à descrição dos raios luminosos, propondo, ao invés, um campo visual, uma ideia mais alinhada com as teorias de Ptolomeu.

Al-Razi e al-Farabi foram defensores notáveis da perspectiva intromissionista de Aristóteles, que defende que as cores são transmitidas aos olhos através do meio. Avicena, por outro lado, criticou as teorias extromissionistas gregas com argumentos incisivos, cuja maior influência foi retórica, pois seus contrapontos já estavam refletidos nos conhecimentos então disponíveis, conforme descrito por Darrigol (2012):

- i. A impossibilidade de o fogo visual alcançar objetos distantes devido à necessidade de preencher grandes espaços;
- ii. A visão borrada de objetos distantes sob a teoria dos raios discretos de Euclides;
- iii. A visão dificultada durante ventanias sob a ideia estóica de ar tensionado pelo pneuma visual.

Os contrapontos incluem (Darrigol, 2012):

- i. A defesa do fogo visual pela sua imaterialidade;
- ii. A complementação dos raios discretos de Euclides pela noção de varredura;
- iii. A substituição do ar tensionado estóico por um meio tensionado mais sutil.

Entretanto, foi Alhazém, em sua obra *De aspectibus*, que superou as críticas predominantes e desenvolveu um conjunto de conceitos e fenômenos logicamente coerentes, opondo-se ao extromissionismo grego. Ele inicia seu texto com uma afirmação sofisticada, destacando-se das teorias extromissionistas ao declarar que “a luz do sol ou chamas atinge os olhos independentemente de a visão ocorrer” (Darrigol, 2012, p. 17).

Conceitos como a necessidade de iluminação do corpo para torná-lo visível, através da reflexão difusa dessa luz que atinge o olho, ou a ideia de que a luz atua ativamente sobre a visão, influenciando o funcionamento interno do olho, não representaram novidades radicais em relação aos gregos.

No entanto, essas ideias consolidaram o intromissionismo em bases mais sólidas. Ao rejeitar a ideia de raio visual, Alhazém estabeleceu que a luz por si só é suficiente para explicar a visão. Essa nova perspectiva também ressaltou a necessidade de revisar as bases da óptica geométrica, originalmente fundada por Euclides e posteriormente refinada por Ptolomeu, que se baseavam no conceito de raios visuais (Darrigol, 2012). Esses novos fundamentos foram estabelecidos a partir de seus estudos sobre espelhos e sombras, além da comparação entre fenômenos anteriormente explicados por meio dos raios visuais e as novas explicações baseadas em raios de luz.

Alhazém também propôs que a região que hoje identificamos como retina é a que recebe os raios luminosos, enquanto a córnea é responsável pela seleção desses raios através da refração. Além disso, ele ofereceu uma explicação para a percepção de distância, baseada em aspectos psicológicos e de memória, sugerindo que o cérebro busca em experiências anteriores referências dos tamanhos de objetos conhecidos para determinar a distância de forma intuitiva.

A partir do século XII, a Europa experimentou um redescobrimento do conhecimento grego, impulsionado pela ampla disponibilidade de fontes em árabe⁵. Esse acesso facilitou movimentos de conciliação entre os pensadores gregos e os eruditos árabes, exemplificado na enciclopédia *Perspectiva*, de Witello. Roger Bacon é um exemplo de sincretismo, integrando as ideias de Platão e Alhazém ao conceito aristotélico de multiplicação de espécies. Nos séculos XIV e XV, este conceito aristotélico, adotado por Bacon, ganhou popularidade e contribuiu para a difusão das teorias intromissionistas da visão (Darrigol, 2012).

No século XVI, os estudos sobre a anatomia do olho evoluíram, destacando similaridades entre o olho, as lentes e a câmara escura. No entanto, ainda não havia evidências claras de que as estruturas oculares e as lentes, de maneira geral, formavam uma imagem do objeto observado.

3.2 PERSPECTIVA

No final do período medieval, durante a transição para a Renascença, a tradição perspectivista foi revivida por meio de diversas reimpressões dos trabalhos de Euclides, Alhazém, Witello e Pecham. Os principais praticantes no século XVI incluíram Maurolico, Della Porta e Risner (Lindberg, 1976). O interesse pela perspectiva expandiu-se para outros campos, incluindo a perspectiva artística, a anatomia ocular, a astronomia e o entretenimento popular, conforme observado por Darrigol (2012).

Além disso, estavam disponíveis duas abordagens principais: a perspectiva angular, originária de Euclides e Ptolomeu e endossada por Alhazém, conforme Euclides (2013, p. 898) descreve no seu oitavo teorema da Óptica: “Magnitudes iguais e paralelas, desigualmente distantes do olho, não são vistas na razão de suas distâncias (a partir do olho)”;⁵ e a perspectiva linear, cujo primeiro tratado sistemático, *Della Pittura* (1435), foi redigido por Alberti.

5 - Durante o califado abássida (séculos VIII-X), estudiosos muçulmanos traduziram e preservaram inúmeras obras gregas clássicas de filosofia, medicina, astronomia e matemática. O contato entre o mundo islâmico e a Europa cristã se intensificou por meio de centros como a Espanha muçulmana (Al-Andalus), Sicília e as Cruzadas. Nesse contexto, surgiram importantes centros de tradução, como a Escola de Tradutores de Toledo, onde textos em árabe, incluindo obras gregas com comentários árabes, foram vertidos para o latim (Rosenthal, 1975).

A projeção angular, também conhecida como *perspectiva naturalis* ou natural, era considerada uma representação do funcionamento da visão, projetando imagens em uma superfície côncava conforme uma lei matemática da visão natural. Em contraste, a projeção linear ou *perspectiva artificialis* visava realizar projeções sobre superfícies planas, como as telas de pintura (Panofsky, 1993).

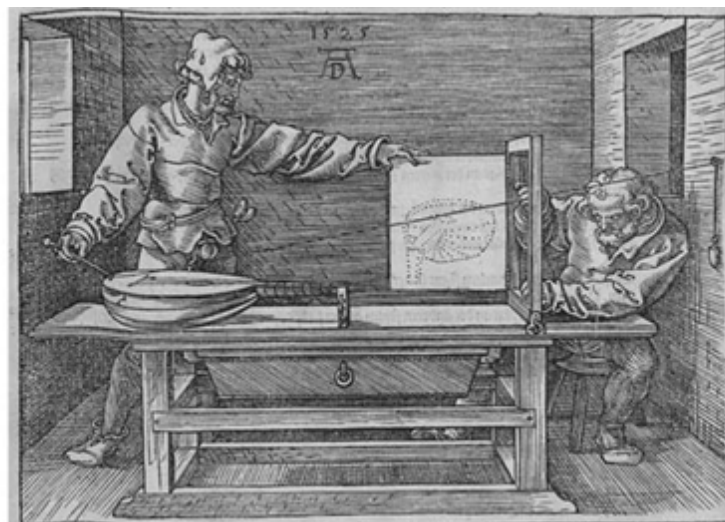
A Óptica da Antiguidade entendia o campo de visão como uma esfera. Sustentava, por isso, que as grandezas aparentes (isto é, as projeções dos objetos dentro desse campo de visão esférico) são, sempre e exclusivamente, determinadas pela amplitude dos ângulos de visão, não pela distância a que os objetos estão do olho (Panofsky, 1993, p. 37).

Albrecht Dürer, que definiu o conceito de perspectiva como “ver através de” (Panofsky, 1993, p. 31), ilustrou as aplicações destas técnicas de projeção linear na Figura 3. No entanto, a relação entre os conhecimentos de óptica e as técnicas de pintura não era amplamente estabelecida. Enquanto alguns artistas possuíam conhecimentos de óptica, muitos outros não tinham essa base, conforme aponta Smith (2015, p. 304-305):

Embora a extensão em que a arte naturalística renascentista em geral, e a perspectiva linear em particular, evoluiu com base na teoria óptica seja uma questão controversa, não há dúvida de que a maioria dos artistas renascentistas foi persuadida - ou pelo menos fingiu - que, para fazer suas pinturas parecerem realistas, eles precisavam de algum conhecimento de óptica e efeitos ópticos.

Figura 3: Representação de dispositivos para pinturas em perspectiva



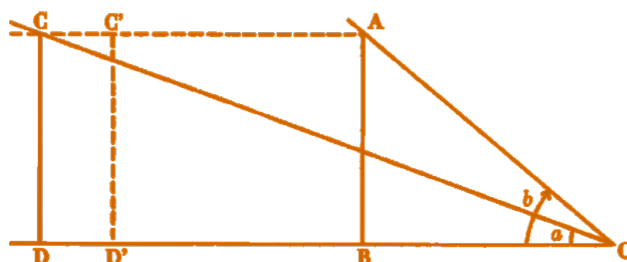


Fonte: (Dürer, 1525, book 4 apud Darrigol, 2012, p. 22)

Matematicamente, a projeção linear correlaciona o tamanho do objeto visto com a distância até o observador, permitindo determinar o tamanho aparente de qualquer objeto na cena ao distorcer o espaço continuamente. Em contraste, a projeção angular, que relaciona os tamanhos ao ângulo visual, não permite tal análise. Segundo Panofsky (1993, p. 41), essa capacidade “(...) é a vantagem imensa do método moderno e a razão de ter sido tão intensamente procurado”.

A seguir, a Figura 4 demonstra as relações de distância e tamanho em ambas as perspectivas:

Figura 4: Na perspectiva linear, quando o objeto AB é deslocado até D', sua altura aparente C'D' reduz-se pela metade, pois OB é metade de OD'. Na perspectiva angular, quando o objeto AB é deslocado até D, sua altura aparente CD reduz-se pela metade, uma vez que seu ângulo de visão a é metade de b



Fonte: Rodrigues Neto, 2013, p. 886

Com a chegada da Renascença, a forma de representar o que se vê mudou significativamente: a perspectiva angular deu lugar à linear. Isso levou inclusive a traduções do Óptica de Euclides com o oitavo teorema corrigido ou suprimido. Entretanto, como Lindberg (1976, p. 178) observa, “a sobrevivência [do perspectivismo] nunca esteve em dúvida: sempre teve alguns praticantes, e foi transmitida com segurança de uma geração para outra pela circulação de manuscritos e por uma tradição de ensino universitário”. Este é o pano de fundo das investigações ópticas de Kepler, que, educado na escola da perspectiva linear e acreditando que linhas retas sempre seriam vistas como tais, precisou revisar sua interpretação diante do fato de que caudas de cometas e trajetórias de meteoros, percebidas como curvas, são de fato linhas retas (Panofsky, 1993).

3.3 KEPLER E A IMAGEM NA RETINA

Johannes Kepler, o renomado astrônomo alemão, adentrou o campo da óptica “(...) pela porta dos fundos da astronomia matemática”, conforme descreve Smith (2015, p. 222). Em 1600, ele foi convidado por Tycho Brahe para trabalhar como seu assistente em Uraniburgo, um avançado observatório astronômico localizado numa ilha entre a Suécia e a Dinamarca. Após a morte de Tycho em 1601, Kepler assumiu o cargo de matemático imperial, posição que ocupou por mais onze anos. Do ponto de vista epistemológico, seu trabalho é considerado uma superação do paradigma grego da óptica, que via esta ciência como uma teoria da visão e de propagação de espécies⁶, reformulando-a como uma teoria da luz.

.....

6 - O conceito de espécies, que em alguns momentos se assemelha ou difere do conceito de formas, é abrangente e sofreu diversas alterações ao longo do tempo, tais como multiplicação de espécies, espécies intencionais, espécies inteligíveis e espécies sensíveis. Smith (2015, p. 249) oferece uma excelente descrição deste conceito, no contexto de como as espécies emanam do objeto a ser visualizado e são percebidas pelo observador: “Mas se as espécies são similitudes ou semelhanças dos objetos que representam, então como elas são semelhantes a esses objetos? Uma opção é supor que de alguma forma elas se assemelham a eles de uma forma quase pictórica. Consequentemente, as espécies visíveis no olho serão de alguma forma “coloridas”, enquanto as espécies sensíveis na imaginação representarão o objeto, como ele existe fisicamente, de maneira análoga àquela em que um retrato pintado retrata seu assunto. Como um retrato, essa espécie transmitirá características “pretendidas” como tamanho, profundidade e textura do objeto sem realmente possuí-las. Por extensão, então, podemos pensar na semelhança cognitiva desta espécie, isto é, a espécie inteligível, como uma representação abstrata altamente generalizada do objeto como um tipo de coisa, ao invés de uma coisa particular, de acordo com suas intenções inteligíveis. A passagem da sensação pura para

O interesse de Kepler pela óptica foi intensificado durante o eclipse solar de 10 de julho de 1600, quando ele observou um fenômeno já notado por Tycho anos antes: o diâmetro da lua, quando medido com uma câmara escura durante um eclipse, apresentava-se maior em $1/5$, apesar de a lua estar à mesma distância da Terra. Esse evento levou Kepler a estudar os trabalhos de Witello e Pecham⁷, onde percebeu que esses autores não compreendiam completamente o fenômeno que descreviam, especialmente a falta de consideração pelo cruzamento dos raios de luz necessários para formar a imagem. (Lindberg, 1976).

Witello e Pecham, em suas tentativas de explicar a formação da imagem, recorreram a conceitos confusos e a um comportamento “arcano” da luz, segundo Kepler (Kepler, GW vol 2, p. 46-48 apud Straker, 1981, p. 286). Para evitar cair nos mesmos erros e desmistificar qualquer aspecto misterioso da luz, Kepler, que já havia aceitado completamente os princípios de propagação da luz delineados pelos ópticos⁸ (Straker, 1981), adotou uma técnica inspirada em Dürer para criar uma perspectiva tridimensional dos raios luminosos.

Uma certa luz me tirou das sombras de Pisanus [Pecham] vários anos atrás. Pois, de fato, como não pude compreender o sentido obscuro de [suas] palavras do diagrama na página, recorri a uma observação pessoal em três dimensões. Coloquei um livro no alto para ocupar o lugar do corpo brilhante. Entre ele e o chão, coloquei uma mesa com uma abertura de vários cantos. Em seguida, um fio foi lançado de um canto do livro pela abertura e caiu no chão; caiu no chão de tal forma que roçou as bordas da abertura; Tracei o caminho produzido e por esse método criei uma figura no chão semelhante à abertura. Da mesma forma, por meio de um fio preso a outro, um terceiro, um quarto canto do livro e, finalmente, a um número indefinido [de pontos] ao longo da borda, resultou no chão um número

a cognição, portanto, se desdobra em uma replicação de representações cada vez mais abstratas e gerais de objetos externos por meio das faculdades psicológicas, as espécies inteligíveis de alguma forma retratando a realidade conceitual subjacente da qual cada objeto é uma instanciação. Isso, de fato, é “espécie” no sentido taxonômico completo, desprovido de toda particularidade física e reduzido ao núcleo conceitual”.

7 - Devido à popularização da imprensa, diversas teorias ópticas e perspectivistas foram repopularizadas, incluindo as de Euclides, Alhazen, Witelo e Pecham. Inicialmente, Kepler buscou soluções para suas questões de óptica nessas fontes. (Lindberg, 1976).

8 - Em especial, a propagação linear dos raios de luz em meios homogêneos.

indefinido de figuras traçadas [cada uma com a forma] da abertura, que juntas produziram uma grande [figura de quatro cantos tendo a] forma do livro (Kepler, GW vol 2, p. 46-48 apud Straker, 1981, p. 287).

Nesse processo, Kepler “redescobriu o princípio de Alhazém e Maurolico de que a imagem na parede da câmara deve ser construída pela superposição dos feixes cônicos que saem dos pontos luminosos do objeto e passam pelo orifício da câmara” (Darrigol, 2012, p. 26). Isso demonstrou que a formação da imagem é independente do formato da abertura da câmara, como Kepler prossegue explicando:

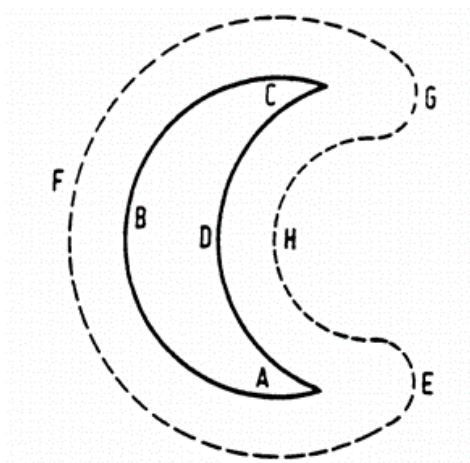
E assim tornou-se possível resolver o problema trazendo a circularidade, não dos raios de visão, mas do próprio sol; não porque o círculo seja a figura mais perfeita, mas porque é a figura do corpo brilhante... (Kepler, GW vol 2, p. 48 apud Straker, 1981, p. 287).

A explicação para a diferença de diâmetros observada por Tycho foi aprimorada por Kepler em uma carta ao seu professor de astronomia, Mästlin, ilustrada na Figura 5⁹:

Se uma abertura pela qual um raio é introduzido é um ponto matemático, a figura apresentada [na tela] é feita exatamente como a figura do sol no céu, ou seja, ABCD [ver Figura 5]. Mas como a abertura tem uma relação sensível entre seu diâmetro e sua distância da tela e também o tamanho da imagem após a interseção [dos raios intrometidos na região da abertura], a luz é amplificada por uma quantidade igual ao raio da abertura e faz EFGH com cantos arredondados. Portanto, o raio do sol é aumentado por uma quantidade igual ao raio da abertura, BF, e pelo mesmo (DH) o raio da lua é diminuído, e os dígitos estão sempre mais no céu do que no raio. Você reunirá o resto sozinho. Portanto, quaisquer eclipses que tenham sido observados dessa maneira precisam de correção (Kepler, 1600, GW, Vol. 14, pp. 150-151 apud Straker, 1981, p. 291).

9 - Ainda nesta mesma carta, Kepler relata ironicamente que, enquanto dedicava a sua atenção para montar o aparato experimental para observar o eclipse, um transeunte percebeu outra “sombra”, a da sua carteira: “Nesse ínterim, estive totalmente ocupado calculando e observando o eclipse solar. Enquanto eu estava envolvido na preparação do instrumento especial, montando as tábuas [e o pano de cobertura] sob o céu, alguém aproveitou a oportunidade para notar uma sombra diferente e produziu não um eclipse do sol, mas da minha carteira, custando-me 30 Florins. Um eclipse caro, por Deus! (...)”

Figura 5: Diagrama feito por Kepler para explicar a influência dos parâmetros da câmara escura no tamanho da imagem formada por ela



Fonte: Kepler, 1600, GW, vol. 14, pp. 150-151 apud Straker, 1981, p. 291

Kepler esclareceu a relação entre o tamanho da imagem formada dentro da câmara escura, o diâmetro da abertura e a distância entre a abertura e a tela. Ele concluiu que a câmara escura aumenta os tamanhos dos objetos observados, o que implicou a necessidade de reconsiderar observações anteriores realizadas através deste instrumento.

Após estabelecer definitivamente como as imagens são formadas em câmaras escuras e impulsionado pelo seu interesse em medidas astronômicas precisas, Kepler voltou sua atenção para o funcionamento do olho humano. Ele reconheceu que o olho poderia estar sujeito a efeitos similares aos observados na câmara escura. As soluções para os problemas associados tanto à câmara escura quanto ao olho humano foram publicadas em sua obra *Ad Vitellionem paralipomena*, de 1604 (Lindberg, 1976, p. 187-188).

Kepler baseou-se na suposição de Giovanni Battista della Porta, que comparou o olho humano a uma câmara escura com uma lente na abertura, aprimorando significativamente a definição da imagem formada em comparação com uma abertura simples. Esses experimentos contribuíram para consolidar a aceitação da teoria da intromissão, conforme descrito por Porta:

Daí os filósofos e ópticos verem claramente como a visão ocorre, e a questão da intromissão, que tem sido tão debatida desde a antiguidade, é assim resolvida; e nenhum outro artifício jamais o demonstrará. A representação [idolum] é introduzida através da pupila, que faz o papel do buraco na janela, e o papel da esfera cristalina situada no meio do olho faz o papel da tela: sei que isso vai agradar muito as mentes engenhosas (Porta, 1589, p. 267 apud Darrigol, 2012, p. 25).

O entendimento de Kepler foi ainda mais enriquecido pelos estudos anatômicos do olho realizados por Felix Platter, que considerava a retina um sensor das espécies visuais e o cristalino uma lente que amplifica, como lente de aumento, essas espécies para a retina (Darrigol, 2012, p. 23). A partir desses estudos, Kepler concluiu que “a retina era o receptor sensível do olho e que o humor cristalino agia como uma lente óptica” (Darrigol, 2012, p. 27).

Além disso, a descoberta de Platter de que o nervo óptico não se conecta com o cristalino, mas sim com a retina — um tecido opaco — permitiu a Kepler delimitar o escopo da óptica geométrica dentro do olho. Para Kepler, a óptica geométrica aplicava-se até a retina, enquanto os processos subsequentes, não ópticos, envolvendo a percepção da imagem pelo cérebro e pela alma, eram mediados por espíritos visuais. Essa etapa pós-retina, conforme descrito por Kepler, deixaria de ser objeto de estudo da óptica pura:

Como a representação ou imagem está ligada aos espíritos visuais que residem na retina e no nervo..., isso deixa para ser discutido pelos físicos [fisiologistas]. Pois o armamento dos Ópticos não os leva além desta primeira parede opaca encontrada dentro do olho [a retina] (Kepler, 1604, p. 168-9 apud Darrigol, 2012, p. 31).

Como resultado de seus estudos sobre o conjunto óptico do olho, Kepler concluiu que a imagem é projetada invertida na retina, exigindo que o processo de pós-processamento a interprete corretamente. Em 1611, Kepler publicou *Dioptrice*, onde discutiu a formação de imagens em sistemas ópticos com duas e três lentes, desenvolveu o telescópio refrator que leva seu nome, e explicou o funcionamento do telescópio de Galileu.

Nesta obra, ele introduziu os conceitos básicos de caracterização de imagens na óptica geométrica, como imagem virtual ou real, direita ou invertida, e aumentada ou reduzida (Caspar, 1993, p. 168). No entanto, sua abordagem na apresentação dessas discussões difere das metodologias modernas; Kepler ainda enfatizava a necessidade de considerar o olho como referência, formando uma imagem que nem sempre está focada na retina, incluindo análises detalhadas sobre imagens virtuais¹⁰ (Darrigol, 2012, p. 34).

3.4 ANÁLISE EPISTEMOLÓGICA

Este capítulo abrange um período que se estende do século V até o início do século XVII, marcado inicialmente pela minuciosa análise dos árabes sobre o conhecimento grego em óptica. Posteriormente, esse saber foi redescoberto pelos europeus, impulsionado especialmente pelo advento da imprensa, e finalmente submetido à visão inovadora de Kepler, que buscava desenvolver sua própria metafísica.

Durante a era grega, a atividade experimental não era um componente central no estudo da óptica. No entanto, com as contribuições árabes, os axiomas de Euclides começaram a ser empiricamente comprovados, uma prática que se expandiu e se tornou fundamental. Esse movimento culminou com Kepler, cujas experimentações permitiram não apenas avançar além da tradição óptica perspectivista, mas também desmistificar demonstrações que eram consideradas preternaturais.

10 - Kepler foi o primeiro a desenvolver de forma sistematizada os conceitos de imagem real (pictura) e imagem virtual (imago). Duprè (2008) afirma que, embora o uso concomitante desses dois conceitos possa ter gerado conflito conceitual na sua época, isso não ocorreu com Kepler. Distinguindo-se claramente da tradição perspectivista, Smith (2015, p. 360) comenta sobre a novidade introduzida por Kepler e a escolha dos termos: "a distinção que Kepler faz aqui é entre imagens virtuais e reais, sendo as primeiras construções psicológicas, dependentes do observador, e as últimas sendo construções físicas, independentes do observador. Dentro do contexto da óptica perspectivista, no entanto, tal distinção não existe porque os perspectivistas viam todas as imagens como virtuais. É presumivelmente em reconhecimento a esse ponto que Kepler designa o que é fisicamente projetado em uma tela como uma "pintura" (pictura), uma vez que consiste em manchas individuais de cor em uma superfície material, em vez de uma "imagem" (imago), que é uma entidade intencional existente em um meio espiritual".

EXTROMISSIONISMO E INTROMISSIONISMO

O extromissionismo, conforme proposto pelos gregos, depende da intenção de ver; nesse sentido, representa um obstáculo animista. Podemos citar duas contribuições significativas que ilustram a superação desse obstáculo e o estabelecimento do intromissionismo:

i) Alhazen, ao afirmar que a luz atinge os olhos independentemente de a visão ocorrer, elimina a necessidade do aspecto vital, pelo menos enquanto a luz não entrou no olho, estabelecendo que a luz é suficiente para explicar a visão;

ii) Os estudos teóricos e experimentais sobre a formação de imagens em câmaras escuras, realizados por Kepler, comprovam a retilinearidade dos raios de luz e afirmam a teoria intromissionista. No contexto do obstáculo animista, esses estudos retiram a importância do olho no processo de formação de imagens.

MULTIPLICAÇÃO DE ESPÉCIES, A NATUREZA DA LUZ E A INVERSÃO DO CONE VISUAL

O conceito escolástico de multiplicação de *espécies* é um excelente exemplo de um obstáculo substancialista. As espécies, segundo essa concepção, podem possuir quaisquer qualidades, modificar-se enquanto se deslocam em um meio e ser percebidas por receptores adequados. Nesse contexto, a luz é considerada um tipo de espécie visual.

Os estudos sobre a formação de imagens na câmara escura, junto com as investigações sobre a anatomia do olho, conforme os trabalhos de Platter, foram fundamentais para Kepler definir os limites da óptica geométrica no olho. Platter aceitou o conceito escolástico de multiplicação de espécies e argumentou que o humor cristalino, ao receber espécies com dimensões reduzidas, amplifica-as para a retina, que funciona como um sensor de espécies visuais.

Por sua vez, Kepler interpreta que o cristalino funciona como uma lente óptica, e a retina, como o receptor sensível do olho. Ele assume que a luz tem uma natureza imaterial e sem massa, com velocidade infinita¹¹, e que seus efeitos são percebidos devido às refrações que ocorrem dentro do olho (Tossato, 2007). Como consequência desse ra-

.....
¹¹ - Mesmo considerando que essa definição de luz será posteriormente revista por outros cientistas, a ideia de ação por contato já não está presente na óptica geométrica de Kepler. Assim, ele supera o obstáculo da intuição primeira, uma noção herdada dos gregos.

cionalismo crescente, Kepler rompe com a ideia de cone visual, conforme proposto por Euclides. Inspirado pelo conceito de fogo visual, Euclides propunha a formação de um cone de raios visuais com o vértice dentro do olho e a base no objeto observado. Em contraste, a análise de Kepler propõe um primeiro cone com a base no cristalino e o vértice no objeto, e um segundo cone com a base no cristalino e o vértice na retina. Segundo essa visão, cada ponto do objeto visualizado é a fonte de um cone, resultando em infinitos cones visuais, cada um com seu vértice correspondente em um ponto exclusivo na retina.

Pode-se concluir que a interpretação de Platter sobre as funções dos elementos constituintes do olho é estagnante, carregada do obstáculo substancialista. Enquanto isso, a racionalização de Kepler permite avançar no desenvolvimento de instrumentos ópticos, ao assumir a luz como promotora da visão e realizar um estudo analítico das propriedades das lentes ópticas.

EXPERIMENTAÇÃO E LUDICIDADE

O obstáculo da experiência primeira pode surgir do maravilhamento estagnante gerado pela demonstração prática de algum fenômeno físico. Apresentamos a seguir um exemplo curioso em que este obstáculo é superado por Kepler.

Na época de Kepler, em Dresden, eram comuns demonstrações de fenômenos ópticos destinadas ao entretenimento, derivadas de uma tradição perspectivista. Segundo Duprè (2008, p. 233), “a óptica foi considerada na corte de Dresden como uma arte matemática produtora de *mirabilia*¹² perspectivistas”. O que diferencia a abordagem de Kepler nos experimentos realizados é que ele “tinha um ponto - um ponto teórico sobre imagens ópticas” (Duprè, 2008, p. 236). Mesmo na presença dessas demonstrações lúdicas, Kepler procurava analisar a óptica que lhes servia de fundamento. Um desses momentos é descrito por Kepler:

.....

12 - Do latim, “coisas maravilhosas”.

Um disco mais grosso no meio, ou uma lente cristalina, com trinta centímetros de diâmetro, estava na entrada de uma câmara fechada, contra uma janelinha, que era a única coisa aberta, um pouco inclinada para a direita. Assim, quando a visão percorreu o vazio escuro, ela também, fortuitamente, atingiu o lugar da imagem, mais próximo, na verdade, do que a lente. E assim, como a lente estava fracamente iluminada, ela não atraiu particularmente os olhos. Mas as paredes também não eram particularmente visíveis através das lentes, porque estavam em profunda escuridão. (Kepler, 1604, p. 164-165 apud Duprè, 2008, p. 220)

Conforme Duprè (2008), foi durante uma dessas apresentações públicas que Kepler percebeu, apenas ele, uma imagem fortuita “no ar”. Surpreendido, ele procurou mais tarde compreender o que havia visto através do conhecimento de óptica disponível e concluiu que os entendimentos eram falhos ou insuficientes. Esse evento, juntamente com suas outras investigações, influenciou Kepler a propor, mais tarde, os conceitos de *pictura e imago*.

4.

O PREDOMÍNIO DO MECANICISMO

Já em 400 a.C., o atomista grego Demócrito perguntou: “O que é vermelhidão?” Uma maçã parece vermelha porque o olho percebe a cor, ou a maçã é feita de átomos vermelhos? (Watson, 2016, p. 116).

4.1 INTRODUÇÃO

Ainda no século XVII, o conhecimento já estabelecido da Óptica podia estar submetido a uma separação difusa entre os domínios da física¹³ e da metafísica¹⁴. Kepler acreditava que a luz era uma emanção divina imaterial, isso era parte da sua metafísica, por meio da qual desejava compreender não apenas os fenômenos ópticos, mas também a natureza da luz. Entretanto, o ramo especulativo das teorias de Kepler foram se tornando cada vez menos importantes para a maioria dos ópticos do século XVII, os quais estavam interessados em uma Óptica aplicada ao desenvolvimento de instrumentos ópticos e à compreensão da visão. Portanto, a herança de Kepler para a Óptica sobreviveu pelo seu pragmatismo, não pelas suas especulações (Darrigol, 2012).

Este período, que representa o estado de espírito no qual Isaac Newton estudou e publicou seus trabalhos, foi marcado pela competição entre o escolasticismo¹⁵ e o mecanicismo, com a crescente importância do último. Darrigol (2012, p. 37) cita alguns motivos para que os filósofos naturais do século dezessete promovessem a substituição do escolasticismo pelo mecanicismo:

13 - Aqui o termo física se refere ao conhecimento, então produzido, que hoje poderia ser considerado científico.

14 - Qualquer sistema filosófico voltado para uma compreensão ontológica, teológica ou suprassensível da realidade (Oxford University Press).

15 - Pensamento cristão da Idade Média, baseado na tentativa de conciliação entre um ideal de racionalidade, corporificado na tradição grega do platonismo e aristotelismo, e a experiência de contato direto com a verdade revelada, tal como a concebe a fé cristã (Oxford University Press).

Muitas razões foram evocadas para esta tendência, incluindo o surgimento de técnicas (que trouxe novos dispositivos mecânicos), a revolução Copernicana (que apagou a distinção entre a física sublunar e supralunar), o neoplatonismo (que favorecia a explicação matemática), a melhoria da posição social dos matemáticos (cuja utilidade foi mais bem reconhecida) e o sucesso da mecânica terrestre de Galileu.

No que diz respeito à Óptica, essas novas teorias propõem duas maneiras distintas de descrever a luz, exploradas respectivamente por Descartes e Newton: i) A primeira faz analogia com a pressão ou movimento de um fluido; ii) A segunda, com o impacto de projéteis. Darrigol (2012, p. 78) comenta que, na abordagem de Descartes, “a maneira mais natural de incorporar a teoria da luz sob a mecânica era adotar um meio mecânico similar ao ar, para a propagação do som, ou aos líquidos, para a transmissão de pressão”. Sobre a escolha de Newton, era

um retorno parcial ao atomismo grego antigo, que poderia ser reinterpretado como uma espécie de filosofia mecânica, (...). Embora a óptica de Newton seja complexa demais para ser reduzida a uma variedade de atomismo, sua concepção da natureza corpuscular da luz dependeu, em parte, do ressurgimento contemporâneo dessa filosofia antiga.

Além de Newton e Descartes, cujas teorias são discutidas neste capítulo, seus contemporâneos também desempenharam papéis significativos, contribuindo em diferentes graus para as discussões científicas da época. Um resumo de suas ideias e obras pode ser encontrado no Quadro 2.

Quadro 2: Contemporâneos de Descartes e/ou Newton que produziram trabalhos sobre Óptica e a data de publicação de suas obras mais famosas

Nome	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES PARA a ÓPTICA	Data de Publicação das Principais Obras	Local de Publicação
Johannes Kepler	Óptica geométrica. Teoria da visão. Formação de imagens em telescópios.	1604 (Ad Vitellionem paralipomena)	Frankfurt, Alemanha
René Descartes	Teoria da luz como pressão ou impulso, lei do seno da refração.	1637 (Discours de la méthode)	Leiden, Países Baixos
Thomas Hobbes	Luz como o movimento de um meio induzido por dilatações e contrações globais da fonte.	1644 (Opticae liber septimus. Em Marin Mersenne, Universae geometriae mixtaeque mathematicae synopsis)	Paris, França
Ole Rømer	Demonstração de que a luz tem uma velocidade finita.	1676 (De´monstration touchant le mouvement de la lumiere)	Londres, Inglaterra
Robert Hooke	Luz como uma sucessão periódica de pulsos causados por vibrações muito rápidas e pequenas da fonte luminosa, que viajam a uma velocidade alta, finita e bem definida em um meio homogêneo.	1665 (Micrographia)	Paris, França
Ignace Gaston Pardies	Propagação da luz e do som como ondas ou compressões periódicas.	1670 (On the motion of undulations)	Leiden, Países Baixos
Christiaan Huygens	Luz como curtos pulsos esféricos emitidos aleatoriamente pelos vários pontos de uma superfície luminosa. Velocidade finita da luz.	1690 (Traité de la Lumière)	Bolonha, Itália
Francesco Maria Grimaldi	Descoberta da difração da luz. A luz como fluido muito veloz, às vezes oscilante.	1665 (Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride)	Paris, França
Marin Mersenne	Analogia entre tons musicais e cores.	1627 (Traité de l'harmonie universelle)	Paris, França
Isaac Newton	Teoria corpuscular da luz. Explicação de refração, reflexão e cores.	1704 (Opticks)	Londres, Inglaterra

Fonte: Adaptado de Darrigol, 2012

4.2 O UNIVERSO MECÂNICO DE DESCARTES

René Descartes (1596 a 1650) foi o primeiro a propor uma teoria sobre a luz que contemplasse a existência de um meio mecânico¹⁶. Esse meio é preenchido por três categorias de matéria: primária, secundária e terciária, descritas a seguir:

i) A matéria primária constitui o Sol e as estrelas fixas, sendo as partículas menores e mais rápidas, um elemento de fogo na sua forma mais pura e refinada. Assim, o Sol, as demais estrelas e o fogo produzem luz. Essas partículas preenchem os espaços entre as partículas maiores e, por isso, não possuem formato definido, negando a existência do vácuo (Nolan, 2016);

ii) A matéria secundária compõe os vórtices celestiais¹⁷ e possui formas esféricas moldadas por inúmeras colisões nesses vórtices. Também denominada de matéria sutil (*subtle matter*), é o elemento essencial do ar. Ela preenche os poros de corpos maiores, enquanto a matéria primária preenche os espaços menores restantes. A matéria secundária permite a transmissão da luz das estrelas distantes até nós (Nolan, 2016);

iii) A matéria terciária compõe planetas, como a Terra, e cometas. São partículas grandes e observáveis, responsáveis pela reflexão e refração da luz. O movimento relativo entre as partículas desta categoria é pequeno ou nulo, o que faz com que seus aglomerados permaneçam estáveis ao longo do tempo (Nolan, 2016).

16 - O objetivo desta seção é introduzir os conceitos fundamentais da Mecânica Cartesiana, essenciais para a discussão da óptica de Descartes, também conhecida como óptica cartesiana. Assim, algumas informações sobre a Mecânica poderão ser omitidas ou simplificadas conforme necessário.

17 - "(...) vórtices de matéria sutil são responsáveis pelos movimentos circulares dos corpos celestes e pela gravidade dos terrestres". (Nolan, 2016, p. 708). As formulações apresentadas por Descartes, em suas leis da mecânica, estabelecem a fundação para a compreensão de todos os fenômenos relacionados à luz. Especificamente, considerando a rotação solar e a interação com a matéria adjacente, sugere-se que uma pressão radial emanaria isotropicamente, resultando em um movimento trêmulo que pode ser caracterizado como luz (Descartes, 1998).

Estabelecendo estas categorias, Descartes descreve o fundamento material do seu sistema mecânico do universo, um universo ausente de vácuo¹⁸, em que há partículas¹⁹ de diversos tamanhos, formas e velocidades, visíveis ou não. Portanto, haveria apenas um tipo de matéria, e suas diferentes propriedades surgiriam a partir do seu grau de divisibilidade e mobilidade em relação às suas partes. A partir disso, Descartes propõe “um relato mecanicista geral do universo, incluindo a formação, transmissão e recepção da luz” (Nolan, 2016, p. 197), o que inclui os fenômenos de reflexão e refração.

4.2.1 A NATUREZA DA LUZ E SUA PROPAGAÇÃO

A teoria mecanicista da luz de Descartes propõe a luz como pressão transmitida através do meio, sensibilizando os olhos e gerando a sensação da visão, esta transmissão da pressão seria instantânea e em linha reta. A luz, pois, seria a tendência ao movimento transmitida através das esferas de matéria secundária²⁰.

A luz nada mais é do que a pressão (inclinação ao movimento ou *conatus*²¹) que o sol e as estrelas exercem sobre as bolas do segundo elemento.

18 - Para Descartes, o corpo material é a sua extensão, ou seja, o espaço é identificado a corpo. O vácuo significaria “uma extensão sem algo que se estenda, ou seja, contrariaria o axioma de que o nada não tem propriedades. Excluído logicamente este nada que se estende, está excluído o vácuo” (Oliva, 2018, p. 63).

19 - O conceito de partículas em Descartes diferencia-se do conceito de átomo. O último trata de algo indivisível, enquanto que o primeiro considera a matéria infinitamente divisível. “Para Descartes, porém, o que importa é que, por natureza, não há indivisíveis, portanto não há átomos, do contrário haveria uma limitação do poder que tem Deus de dividir qualquer extensão, por menor que seja. Descartes, assim, poderá falar de partículas ou corpúsculos, nunca de átomos.” (Oliva, 2018, p. 63).

20 - Esta proposta pode gerar muitas dúvidas, mas Descartes se esforçou em oferecer várias justificativas, usando de forma habilidosa analogias mecânicas. Em especial, ele explorou como seria possível a luz se propagar em linha reta por um meio formado por esferas de tamanhos variados e dispostas de forma não uniforme.

21 - Conatus é um conceito fundamental na mecânica de Descartes, representando uma espécie de inércia, ou seja, uma tendência do corpo em permanecer em seu estado, ao ponto de oferecer resistência a qualquer tentativa de mudança (Oliva, 2018). “De modo que um corpo que se junta a outro corpo tem alguma força para impedir que seja separado dele; e quando é separado, tem alguma força para impedir que não lhe seja unido; e também que, quando em repouso, tem a força para permanecer neste repouso e resistir a tudo o que poderia fazê-lo mudar. Do mesmo modo que, quando se move, tem a força para continuar a mover-se com a mesma velocidade e para o mesmo lado.” (Oliva, 2018, p. 64 apud Descartes, 1998, II, 43, p.193).

Esta pressão é transmitida ao olho de forma instantânea e retilínea, devido à contiguidade das bolas e à sua perfeita rigidez (Darrigol, 2012, p. 39).

Outro aspecto importante do contexto histórico da teoria da luz de Descartes é que seu meio mecânico permite descrever a natureza e a transmissão da luz, eliminando a necessidade das “espécies intencionais” e opondo-se, assim, ao escolasticismo. A respeito disso, em seu ensaio *La Dioptrique*, ou, em português, “Óptica”, o filósofo utiliza a analogia da bengala de um cego e como este, o cego, é capaz de perceber as características do solo ou de outros objetos sem a necessidade de transmissão de qualquer matéria, mas apenas por meio de uma pressão ou *conatus* através da bengala²²:

(...) não há necessidade de assumir que algo material passe dos objetos para nossos olhos para nos fazer ver cores e luz. Nem há algo nesses objetos que seja semelhante às ideias ou às sensações que temos deles. Assim como nada sai dos corpos que um homem cego sente, o que deve ser transmitido ao longo do comprimento de seu bastão até sua mão. A resistência ou o movimento destes corpos, que é a única causa das sensações que ele tem deles, não é nada parecido com as ideias que ele forma deles. Ao entender isso, sua mente será libertada de todas aquelas pequenas imagens que voam pelo ar, chamadas *espécies intencionais*, que preocupam demais a imaginação dos Filósofos. (Descartes, 1965, p. 68, grifo no original).

Desenvolvendo a partir desta analogia²³, Descartes explora a possibilidade de que a ação possa partir tanto do objeto quanto da bengala; ou seja, a bengala pode ir em direção

.....

22 - Em sua obra “O Mundo”, publicada 14 anos antes de “Discurso Sobre o Método”, que contém o ensaio “Óptica”, Descartes aborda este assunto de uma forma mais geral, ele afirma que “Ao apresentar uma descrição da luz, a primeira coisa que quero chamar a sua atenção é que é possível que haja uma diferença entre a sensação que temos dela, isto é, a ideia que dela formamos em nossa imaginação por intermédio de nossos olhos, e o que há nos objetos que produz a sensação em nós, ou seja, o que há na chama ou no Sol que chamamos de “luz” (Descartes, 1998, p. 3).

23 - Este caso exemplifica como as analogias podem levar a conclusões errôneas, a exemplo da visão noturna dos gatos, discutida mais adiante no texto. A opinião de Bachelard a respeito do uso de metáforas se aplica igualmente às analogias. Ele é cauteloso quanto à adoção de metáforas, cuja aceitação no ensino da ciência moderna se justifica apenas quando estas são construídas a partir de explicações científicas. No entanto, a tentação do realismo ainda persiste, especialmente entre estudantes. Assim, é essencial que o professor esclareça as limitações dessas representações, evitando que os alunos se entreguem à preguiça intelectual, pois “o perigo das metáforas imediatas para a formação do espírito científico é que nem sempre são imagens passageiras; levam a um pensamento autônomo; tendem a completar-se, a concluir-se no reino da imagem” (Bachelard, 2005, p. 101).

ao objeto, ou o objeto pode se mover até a bengala, e, em ambos os casos, o cego “verá”. Neste contexto, a pressão gerada pelo contato entre a bengala e o objeto é a própria luz.

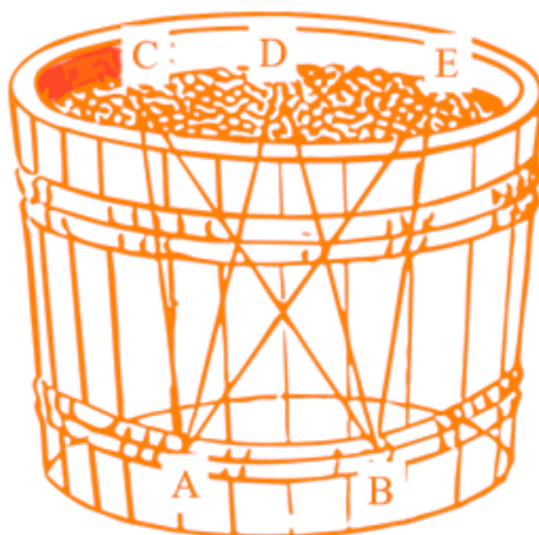
Assim, Descartes recupera o conceito de fogo visual, em uma versão muito próxima da proposta estoica, mas argumenta que o processo da visão, cuja ação parte do observador, não se verifica nos humanos, “pois a *experiência*²⁴ mostra que estes objetos devem ser luminosos ou iluminados para serem vistos” (Descartes, 1965, p. 68, grifo do autor). No entanto, em alguns animais com visão noturna, seria possível a inversão do sentido da ação:

No entanto, porque essa ação não é nada além de luz, devemos notar que é apenas aqueles que podem ver durante a escuridão da noite, como os gatos, em cujos olhos essa ação é encontrada; e que, quanto ao homem comum, ele vê apenas pela ação que vem dos objetos. (Descartes, 1965, p. 68).

Ciente da fragilidade desta analogia e procurando complementá-la, Descartes faz uso da imagem de um barril de uvas semiprensadas, Figura 6, elemento típico nas regiões vinícolas em época de colheita. Com esta analogia, pretende-se mostrar como a luz pode se propagar em linha reta em um meio homogêneo e esclarecer o conceito cartesiano de propagação da luz. Ele justifica a necessidade de complementar a sua ideia inicial “pois há uma grande diferença entre a bengala deste homem cego e o ar ou outro meio transparente através do qual enxergamos, farei uso ainda de outra comparação” (Descartes, 1965, p. 68-69).

24 - O termo “experiência”, neste contexto, assume grande significância, pois Descartes parece resgatar a ideia do fogo visual, agora sob sua concepção mecanicista do universo. Contudo, ele consegue superar, ao menos parcialmente, esse conceito grego ao se apoiar nos resultados de suas experiências. No entanto, a utilização da experiência como validador da teoria de Descartes era limitada, especialmente devido a restrições tecnológicas. Por exemplo, naquela época, a experiência ainda não tinha capacidade de validar sua afirmação sobre a ausência de vácuo na Natureza. Assim, Descartes recorre à seguinte justificativa: “(...) não há vácuo na Natureza, como quase todos os Filósofos afirmam, (...)” (Descartes, 1965, p. 69).

Figura 6: Cuba cheia de uvas parcialmente prensadas. A e B são os furos para os quais o vinho em C, D e E flui



Fonte: Descartes, 1965, p. 69

Nesta comparação, o vinho seria a matéria refinada, que preencheria todos os poros da matéria sólida ou mais densa, esta última representada pelos cachos de uva. Isto para ratificar a ausência de vazios, garantindo a continuidade de matéria entre as fontes luminosas e nossos olhos. Os cachos de uva formariam uma espécie de esqueleto estável, de tal forma que, se os pontos A e B na Figura 6 forem abertos, apenas o vinho sairia por eles. Observando a dinâmica do vinho escorrendo, pode-se chegar à conclusão de que, a partir de cada um dos pontos C, D e E, o vinho fluirá instantaneamente em linha reta para cada um dos pontos A e B, formando trajetórias que se cruzam, mas não são impedidas pelos fluxos contrários de vinho ou pelos cachos de uva.

Com essa argumentação, Descartes busca justificar como o Sol, ao tocar a matéria do segundo elemento, cria a pressão que é percebida por nós assim que abrimos os olhos, de forma instantânea. No contexto desta analogia, isso equivale à existência do fluxo de vinho assim que o buraco é aberto. Uma outra consequência dessa analogia é demonstrar que, independentemente de a luz viajar através de corpos sólidos transparentes, como o

vidro, ou por meio de matéria fluida transparente, como o ar ou fluxos de vento, a luz continuará se movendo em linha reta da fonte até os olhos²⁵.

Entretanto, uma análise franca do possível trajeto de uma porção de vinho a partir do ponto C, por exemplo, levaria à conclusão de que:

i) é possível chegar aos pontos A ou B, porém não através de uma linha reta, especialmente devido à presença das uvas;

ii) uma porção de vinho não pode, simultaneamente, seguir em direção a A e B.

Para responder ao primeiro questionamento, ele sugere que as partículas de vinho tendem a se mover de C para A e B seguindo uma trajetória retilínea, no que denomina *linha de ação*, ainda que o movimento real possa não seguir exatamente essa direção. Quanto ao segundo questionamento, Descartes afirma a existência de infinitas linhas de ação, apontando simultaneamente para todas as direções. Nas palavras de Descartes: “(...) considerando que não é tanto o movimento, mas a ação dos corpos luminosos que deve ser tomada como sua luz, você deve julgar que os raios dessa luz nada mais são do que as linhas ao longo das quais tende essa ação” (Descartes, 1965, p. 70).

4.2.2 OS FENÔMENOS DE REFLEXÃO E REFRAÇÃO

Os fenômenos de reflexão e refração são explicados por Descartes a partir de hábeis analogias com partículas em movimento. Estas analogias estão amparadas em algumas premissas. A primeira delas, previamente mencionada, assume que o estudo de corpos em movimento é válido para compreender o comportamento da luz; a segunda delimita quais grandezas do movimento são relevantes para o estudo da luz, descartando efeitos atribuídos ao peso, volume ou forma do objeto, e considerando exclusivamente a velocidade total (Descartes, 1965).

.....

25 - É crucial entender que, para Descartes, a concepção de propagação da luz está intrinsecamente ligada ao seu conceito de conatus; assim, a luz é entendida como uma tendência ao movimento. De forma mais específica, a luz não é o movimento per se, mas Descartes recorre a analogias envolvendo partículas em movimento para elucidar a propagação da luz em meios homogêneos e, posteriormente, nos fenômenos de reflexão e refração. Para esclarecer essa possível confusão conceitual e fundamentar suas analogias, ele declara: “É muito fácil acreditar que a ação ou a inclinação para se mover, a qual eu disse que deve ser considerada como luz, deve seguir, neste caso, as mesmas leis que regem o movimento” (Descartes, 1965, p. 70).

Para esclarecer o fenômeno da reflexão, Descartes propôs uma distinção entre a força que impulsiona uma bola, iniciando seu movimento, e uma segunda força que atua exclusivamente na modificação da trajetória desse movimento.

Para fundamentar esse conceito, Descartes recorre ao exemplo de uma raquete impelindo uma bola. Ele sustenta que, independentemente da magnitude dessa força, ela determina a velocidade total da bola. No entanto, mantendo-se essa velocidade constante, a bola pode adotar diferentes direções, dependendo do ângulo e do ponto de contato com a raquete. Isso estabelece duas categorias distintas de força: a primeira responsável pela imposição da velocidade total e a segunda responsável pela alteração da direção do movimento, sem influenciar a velocidade. Portanto, a direção da bola pode ser modificada sem que haja uma alteração na sua velocidade total²⁶.

É apenas necessário notar que a força, qualquer que seja, que faz com que o movimento desta bola continue é diferente daquela que a determina a mover-se numa direção e não noutra, como é bastante fácil de saber pelo fato de que é da força com que a raquete a impulsionou que depende o seu movimento, e que essa mesma força poderia ter sido capaz de fazê-la mover-se em qualquer outra direção tão facilmente quanto em direção a B [Figura 7]; ao passo que é a posição desta raquete que a determina a tender para B, e que poderia tê-la determinado a tender para lá da mesma maneira, mesmo que outra força a tivesse movido. (Descartes, 1965, p. 75-76).

A situação mais simples para ilustrar a reflexão é apresentada na Figura 7, que mostra uma bola em movimento retilíneo e com velocidade constante, graças à homoge-

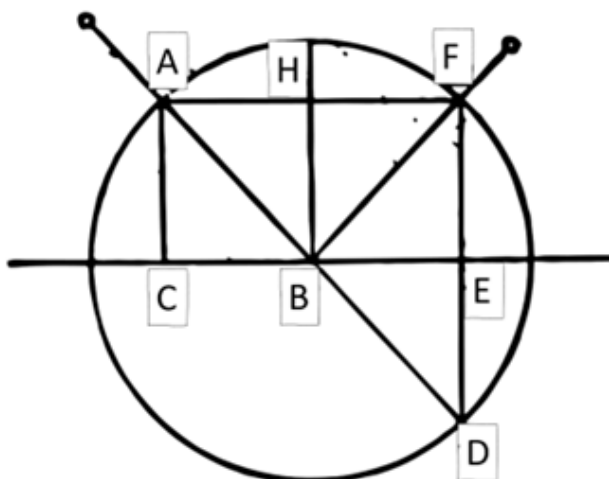
.....

26 - Para elucidar as variações no movimento da bola, Descartes recorre aos termos "movimento" e "mudança de direção". Em termos contemporâneos, usaríamos "velocidade total" ou simplesmente "velocidade" para descrever o módulo da velocidade, enquanto "direção", neste contexto, engloba tanto a orientação (por exemplo, vertical ou horizontal) quanto o sentido (por exemplo, para cima ou para baixo) do deslocamento. Posteriormente, introduz-se o conceito de "determinação", que se diferencia da velocidade da bola, pois, embora a determinação possa mudar, a velocidade pode permanecer constante. Assim, a determinação relaciona-se com a direção da quantidade de movimento do corpo, e não com o módulo de sua velocidade. Contudo, o conceito de "determinação" proposto por Descartes é complexo e, nas discussões acerca da reflexão e refração abordadas neste texto, optou-se por uma interpretação mais contemporânea, com o objetivo de tornar as conclusões de Descartes mais acessíveis, evitando o aprofundamento na mecânica cartesiana. Para uma análise mais detalhada sobre esse conceito, recomenda-se a leitura de Slowik (2023).

neidade do meio. A bola, partindo da posição A em direção a B, ao encontrar a superfície CBE — que é rígida e uniforme — sofrerá uma mudança em sua trajetória, levando-a a seguir até o ponto F. Em todas as fases do movimento, a velocidade da bola permanece constante; a alteração na direção do movimento, provocada pelo contato com a superfície CBE, não modifica essa velocidade.

Este estudo pode ser feito decompondo o movimento da bola na linha AB em direções vertical, de AF até CE, e horizontal, de AC até FE. Na direção vertical, a bola encontra resistência na superfície CBE, o que resulta na inversão de seu movimento. Por outro lado, na direção horizontal, a bola não encontra resistência, prosseguindo em seu trajeto original.

Figura 7: Diagrama ilustrando o fenômeno da reflexão



Fonte: Descartes, 1965, p. 75

Dado que a velocidade da bola permanece constante, é necessário que ela atravesse algum ponto sobre a circunferência do círculo após ser refletida. Isso decorre do fato de que a bola deve cobrir a mesma distância nos mesmos intervalos de tempo, tanto antes quanto após a reflexão. Para encontrar exatamente este ponto, toma-se três linhas retas (AC, HB, e FE) perpendiculares a CE, com distâncias iguais entre si. O tempo necessário para percorrer o trajeto de A para B é o mesmo para percorrer o trajeto de HB até algum

ponto de FE. A posição dos pontos e a igualdade das distâncias (são raios do círculo) implicam que a bola, ao se mover nessa direção, só pode atingir a circunferência do círculo AFD em dois pontos, D ou F, onde a circunferência e a linha FE se intersectam. Como o movimento da bola em direção a D é impedido pelo chão, conclui-se que a bola deve necessariamente seguir em direção a F (Descartes, 1965).

Desta forma, Descartes demonstra que os raios incidente e refletido e a reta normal à superfície no ponto de incidência são coplanares. Além disso, ele estabelece que os ângulos de incidência e reflexão são iguais.

E assim você pode ver facilmente como ocorre a reflexão, nomeadamente segundo um ângulo que é sempre igual àquele que chamamos de ângulo de incidência; da mesma forma que se um raio, vindo do ponto A, incide no ponto B na superfície do espelho plano CBE, ele é refletido em direção a F de tal maneira que o ângulo de reflexão FBE não é nem maior nem menor que aquele do ângulo de incidência ABC. (Descartes, 1965, p. 77).

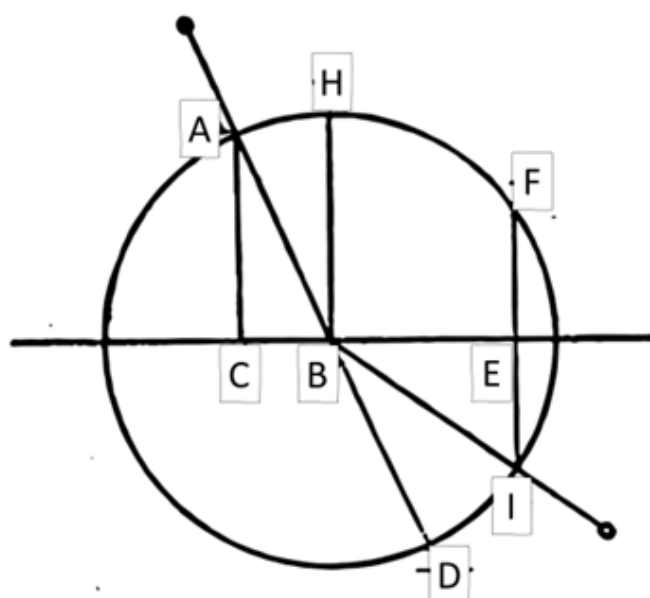
A descrição da refração apresentada por Descartes é uma continuação lógica da mecânica da reflexão, ou seja, é entendida dentro do mesmo quadro conceitual que ele usou para explicar a reflexão (Descartes, 1965). Na sua primeira analogia, propõe-se que uma bola, impelida em A e seguindo até B, encontra uma superfície CBE (ver Figura 8). Esta superfície não é rígida, mas sim um tecido frágil, de tal forma que a bola, ao atingi-lo, continua avançando ao custo de perder metade da sua velocidade²⁷.

Traça-se um círculo (AFD) com centro em B e linhas perpendiculares a CBE (AC, HB, FE), de forma que a distância entre FE e HB seja o dobro da distância entre HB e AC. Divide-se o movimento da bola em direções vertical e horizontal, de tal forma que o contato com o tecido altere somente sua componente vertical. Ou seja, após romper o tecido, a bola mantém a mesma velocidade horizontal, mas com apenas metade de sua velocidade vertical. Esta alteração de velocidade muda a direção da bola de BD, caso

27 - A perda de metade da velocidade é um valor arbitrário proposto por Descartes, a fim de simplificar o raciocínio que vem a seguir e não limita a abrangência dos seus resultados.

CBE estivesse ausente, para BI. O ponto I, neste caso, não é obtido exatamente, mas é apresentado como indicativo da mudança de direção do movimento da bola, aproximando-se mais da superfície CBE.

Figura 8: Diagrama ilustrando o fenômeno da refração



Fonte: Descartes, 1965, p. 78

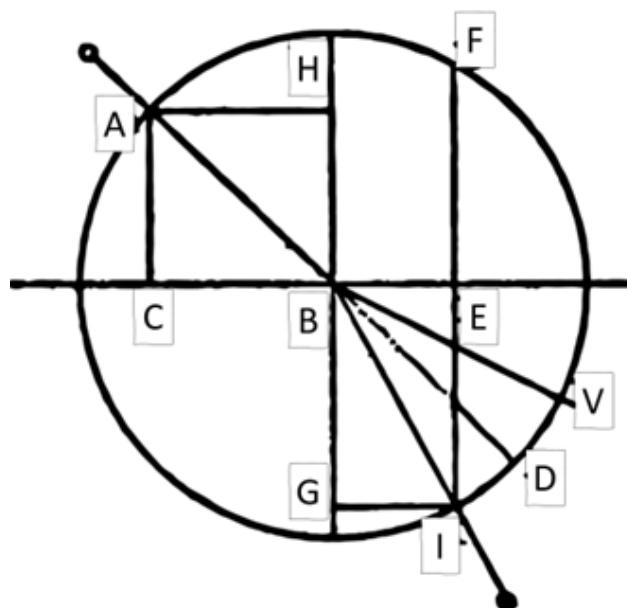
A próxima analogia pretende explicar o comportamento da luz na água adotando o mesmo diagrama da Figura 8. O ponto principal é o de que a mudança de trajetória da bola ocorre apenas na superfície de separação dos meios, de maneira idêntica à do tecido. Dentro do volume de água, na região abaixo de CBE, a água pode “abrir-se” para permitir a passagem da bola, implicando que, apesar da resistência, a água não impede o movimento da bola nem altera sua direção depois do desvio inicial. Isso indica que a bola pode se mover igualmente em qualquer direção uma vez que esteja na água, assumindo que não haja outras forças atuando sobre ela (como correntes de água ou a influência de outras variáveis físicas).

Então, quanto ao resto do corpo de água que preenche todo o espaço entre B e I, embora possa resistir à bola mais ou menos do que o ar que presumimos estar lá antes, isso não quer dizer que por isso deve desviá-lo mais

ou menos: pois pode abrir-se para permitir-lhe a passagem, tão facilmente numa direção como noutra, pelo menos se sempre assumirmos, como fazemos, que nem o peso nem a leveza desta bola, nem o seu volume, nem qualquer outra causa estranha altera o seu curso. (Descartes, 1965, p. 79).

Seguindo esta lógica, Descartes discute o caso que se enquadraria no princípio de reversibilidade da luz, analisando a trajetória da bola no sentido inverso, da água para o ar. A analogia seria a bola receber um novo impulso da raquete no momento em que encontra a superfície CBE, seguindo a trajetória de A até B e, depois, até I (Figura 9). Nesta situação, ao invés de perder parte de sua velocidade vertical, a bola aumentaria sua velocidade nessa componente, o que faria o desvio de trajetória ser no sentido oposto ao do sistema ar-água, afastando-se da superfície CBE e passando por I.

Figura 9: Diagrama ilustrando o fenômeno da refração água-ar



Fonte: Descartes, 1965, p. 80

Nos casos considerados por Descartes, conforme as Figuras Figura 8 e Figura 9, há um aumento ou diminuição na velocidade da bola ao encontrar-se com uma superfície. Essa mudança na velocidade ocorre na sua componente perpendicular, mas não é apre-

sentado como calcular esta força e, portanto, não se pode, daí, obter o caminho do feixe refratado. Portanto, a lei da refração é obtida a partir de duas suposições (Sabra, 1981):

i. Há uma constante n que relaciona a velocidade de incidência v_i e a velocidade refratada v_r ,

$$v_r = nv_i$$

Essa relação indica que a velocidade é uma característica intrínseca do meio, sugerindo que ela não possui relação com o ângulo da trajetória percorrida dentro desse meio;

ii. A velocidade paralela, ou horizontal, permanece constante, daí:

$$v_i \sin i = v_r \sin r.$$

Descartes (1965, p. 80) comenta, referindo-se à Figura 9, que as relações de proporcionalidade devem ser feitas entre as retas CB e BE, que são obtidas a partir dos senos dos ângulos de incidência e refração, e não diretamente a partir dos ângulos em si:

Apenas é necessário ter o cuidado de que essa inclinação seja medida pela quantidade das linhas retas, como CB ou AH, e EB ou IG, e semelhantes, comparadas entre si; não por aquelas dos ângulos como ABH ou GBI, nem ainda menos por aqueles, como DBI, que chamamos de ângulos de refração. Pois a razão ou proporção entre esses ângulos varia com todas as diferentes inclinações dos raios; enquanto que entre as linhas AH e IG, ou outras semelhantes, permanece a mesma em todas as refrações causadas pelos mesmos corpos.

Combinando as duas equações, obtemos

$$\sin i = n \sin r$$

e relacionando as velocidades,

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_r}{v_i} = n.$$

Portanto, obtendo a lei da refração²⁸.

28 - Conforme Sabra (1981), a primeira tentativa de elucidar o fenômeno da refração é atribuída a Ptolomeu,

4.3 O UNIVERSO MECÂNICO DE NEWTON

Questão 28. Não são todas as Hipóteses errôneas, nas quais se supõe que a Luz consista em Pressão ou Movimento, propagados através de um meio fluido? Pois, em todas essas Hipóteses, os fenômenos da Luz têm sido até agora explicados supondo que eles surgem de novas Modificações dos Raios; o que é uma suposição errônea. Se a Luz consistisse apenas em Pressão propagada sem Movimento real, ela não seria capaz de agitar e aquecer os Corpos que a refratam e refletem. Se consistisse em Movimento propagado a todas as distâncias num instante, exigiria uma força infinita a cada momento, em cada Partícula luminosa, para gerar esse Movimento. E se consistisse em Pressão ou Movimento, propagados seja num instante ou ao longo do tempo, ela se dobraria para a Sombra. Pois Pressão ou Movimento não podem ser propagados num Fluido em Linhas retas, além de um Obstáculo que para parte do Movimento, mas dobrará e se espalhará por todos os lados no meio quiescente que jaz além do Obstáculo. (Newton, 2012, p. 362).

A abordagem dada à Óptica por Newton está relacionada com as novas variantes do atomismo que surgiram no século XVII, as quais também se dedicaram a se opor ao cartesianismo e, ao mesmo tempo, a doutrina escolástica.

Enquanto a doutrina escolástica colocava a luz e os fenômenos das cores na categoria de “formas e qualidades”, homens como Newton opunham a essa visão tradicional uma explicação dos fenômenos da natureza em termos da ação mecânica dos átomos, ou da matéria e movimento. (Cohen, 2012, p. xlv).

e praticamente todas as tentativas subsequentes até a obra de Descartes basearam-se nos estudos de Alhazém. Descartes foi diretamente influenciado por Alhazém, além de ter sido inspirado por Witello e Kepler. Notavelmente, Alhazém esteve muito próximo de deduzir a lei da refração por si mesmo, e Kepler empregou a analogia de uma esfera incidindo na superfície da água, evidenciando a percepção de que a refração resultava de uma ação na interface. Foi Descartes, contudo, quem conseguiu formular a primeira descrição físico-matemática conclusiva que levou à lei da refração, quase simultaneamente a Snell, o que gerou debates sobre a possibilidade de Descartes ter adaptado suas analogias mecânicas para formular uma lei da refração já conhecida por Snell. Apesar disso, a questão permanece no âmbito da especulação, com argumentos tanto a favor quanto contra essa hipótese. Independentemente, a abordagem de Descartes na análise dos fenômenos de reflexão e refração foi pioneira. Por meio de um estudo teórico, ele descreveu, de forma algébrica e geométrica, um fenômeno físico dinâmico, contrastando com as abordagens anteriores que se limitavam a “modelos para a estática, a teoria dos centros de gravidade e o princípio de Arquimedes” (Sabra, 1981, p. 104). Essa metodologia dedutiva cartesiana foi reconhecida e elogiada até mesmo por aqueles que discordavam de seus resultados, a exemplo de Fermat e Ernst Mach.

Os três principais protagonistas do ressurgimento da visão neoatomista e suas ideias fundamentais são destacados no Quadro 3. Eles são Isaac Beeckman, Pierre Gassendi e Walter Charleton.

Quadro 3: Os três principais nomes dos protagonistas do ressurgimento da visão neoatomista

Nome	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES PARA A ÓPTICA (séc. XVII)
Isaac Beeckman (Holanda)	"(...) rejeitou as efígies voadoras dos antigos atomistas; adaptou seu atomismo à ideia de Alhazen de que a luz era responsável pela visão; e aceitou a análise de Kepler sobre o olho." (Darrigol, 2012, p. 78).
Pierre Gassendi (França)	"(...) definiu raios como a trajetória reta dos corpúsculos; explicou reflexão e refração por analogia com o movimento de uma bola na fronteira entre dois meios porosos com quantidades desiguais de poros; cores como uma mistura aristotélica de luz e sombra." (ibid., p. 79).
Walter Charleton (Inglaterra)	Propagou as ideias de Gassendi, mas ainda mantinha a ideia de Epicuro e Lucrécio das efígies emanadas pela superfície do corpo; indeciso sobre a natureza das cores, considerava-as uma contaminação da luz pelo corpo ou como mistura de luz e sombra. (ibid.).

Ainda como estudante de graduação, em suas notas filosóficas²⁹, Newton citou Charleton, concordando com a existência do vácuo. Argumentava que a matéria seria formada por partes indivisíveis em número finito, posicionando-se, assim, em contraposição ao Cartesianismo. Em relação às esferas, ou glóbulos, relacionadas ao segundo elemento, que seriam responsáveis pela transmissão da luz, Newton argumentava que a gravidade³⁰

29 - As notas, ou questões, filosóficas fazem parte do Caderno da Trinity College de Newton, que foi "utilizado por ele como estudante de graduação, de aproximadamente 1661 a 1665. Inclui suas anotações sobre livros recomendados para seus estudos, mas também mostra seu início em leituras independentes e comentários não apenas sobre fontes clássicas, mas também sobre escritas filosóficas naturais contemporâneas, como as obras de René Descartes ou o matemático holandês Willebrord Snell" (Guicciardini, s.d.). Além disso, continha as suas primeiras análises dos trabalhos de Walter Charleton, quem viria a influenciar diretamente seus primeiros estudos sobre óptica.

30 - O conceito de *gravitas* (do latim, "peso") foi adotado primeiramente pelos gregos para justificar a ideia de "lugar próprio". Galileu utilizou a mesma palavra para se referir à tendência dos corpos de caírem em direção ao centro da Terra. Newton publicou sua Lei da Gravitação Universal em 1687, portanto, posteriormente a essas anotações. Entretanto, é reconhecido que ele tinha conhecimento dos trabalhos de Galileu e foi influenciado pela palavra *gravitas* ao nomear sua lei da gravitação (Westfall, 1980).

poderia pressionar essas esferas, gerando luz. De maneira similar, a luz poderia ser produzida pelo movimento da Terra no espaço ou pela movimentação do observador. Avançando mais nesta questão, Newton explorou como os fluidos em equilíbrio são afetados pela gravidade. Sua conclusão foi que isso contradiz o processo de propagação retilínea da luz proposto por Descartes, já que a variação de pressão é percebida de forma uniforme em todo o volume do fluido (Darrigol, 2012).

Sobre a natureza da luz, desde suas notas filosóficas, Newton defendia a luz como glóbulos ou corpúsculos muito rápidos e que, de fato, viajavam³¹ em linha reta. Na Questão 29 de Opticks (Newton, 2012, p. 370), Newton deixa clara sua preferência pela natureza corpuscular da luz, já levando em conta e rejeitando a hipótese ondulatória³²: “Não são os Raios de Luz corpos muito pequenos emitidos por substâncias luminosas? Pois tais corpos passarão por meios uniformes em linhas retas sem se dobrarem para a sombra, o que é a natureza dos Raios de Luz.” Esta ação mecânica dos átomos seria suficiente para explicar os fenômenos da reflexão e refração. A refração, em especial, poderia ser explicada pela atração dos corpúsculos pelo vidro ou água, que causaria um aumento da sua velocidade vertical e consequente aproximação da trajetória da partícula à reta normal à superfície³³.

31 - Em contraposição a Descartes, que interpretava a tendência ao movimento como algo que poderia ser equivalente a um movimento real na mesma trajetória, Newton defendia que as partículas de luz estão, de fato, em movimento.

32 - Pode-se considerar que, em sua obra Opticks, Newton antecipou ideias que se alinham à teoria ondulatória da luz. No entanto, dadas as limitações do contexto científico de sua época, ele não conseguiu conciliar as visões corpuscular e ondulatória. Isso porque, no século XIX, a física operava sob o princípio de que, diante de duas teorias conflitantes, apenas uma poderia ser validada por meio de experimentos específicos. A escolha de Newton pela teoria corpuscular foi posteriormente vista, durante o surgimento da teoria ondulatória da luz no século XIX, como um equívoco de um gênio. Tentativas posteriores de reinterpretar Opticks buscaram resgatar sua validade, eliminando o aspecto corpuscular e enfatizando o ondulatório. Contudo, é crucial destacar que a escolha de Newton foi intencionalmente voltada para a explicação atomista, rejeitando explicitamente a teoria ondulatória proposta por Huygens. Huygens, por sua vez, era um cartesiano e adaptou o modelo de Descartes ao propor que a matéria era composta por esferas contíguas e elásticas. Tal proposição deu origem ao que hoje conhecemos como princípio de Huygens. (Cohen, 2012; Sabra, 1981).

33 - A interpretação de Newton sobre a refração sugeria que as partículas de luz movem-se mais rapidamente em meios mais densos, uma visão que contrastava diretamente com a teoria ondulatória de Huygens e que foi geralmente aceita até meados do século XIX (Sabra, 1981). Publicada na segunda metade do século XVII, a teoria de Huygens propunha exatamente o oposto. O dilema entre essas visões conflitantes foi resolvido somente no século XIX, através dos estudos de Young e Fresnel. (Cohen, 2012).

Entretanto, foi o seu estudo da refração da luz solar (branca) e indiretamente da natureza das cores que moldou a percepção de Newton sobre a luz e os fenômenos ópticos. A partir desta concepção, ele fez uso de prismas como analisadores de velocidade destes glóbulos, pois ele compreendia que a refração alteraria as velocidades destes corpúsculos³⁴. Darrigol (2012, p. 80-81) esclarece que Newton, já nas suas primeiras reflexões sobre o assunto, em 1664,

esboçou duas teorias das cores dos corpos, uma na qual a cor era produzida pelo realce de uma classe de velocidade entre partículas de massa igual, outra na qual resultava do realce de uma classe de momento entre partículas de massas diferentes e velocidade inicial igual. Nesse estágio, Newton já tinha a ideia de que a luz branca era uma mistura heterogênea de luzes de diferentes cores e que um prisma poderia ser usado para separar os vários componentes coloridos.

4.3.1 A TEORIA DA LUZ E CORES DE NEWTON

A primeira publicação científica de Newton na área da óptica, sua teoria sobre as cores prismáticas, ocorreu em 1672, quando ele apresentou sua “Nova Teoria sobre Luz e Cores” (Newton, 1672)³⁵. Neste artigo, Newton revelou que suas primeiras experimentações em óptica foram motivadas pela investigação da correção da aberração cromática em telescópios refratores³⁶. Com esse objetivo, ele mesmo começou a polir vidros ópticos em

34 - Newton concluiu que a cor observada é determinada pela velocidade das partículas de luz, ou corpúsculos, como ele se referia na época, ao atingirem a retina. Para sustentar essa ideia, ele sugeriu que a cor branca é o resultado de uma mistura heterogênea de velocidades. Essa mistura pode ser entendida como a combinação de todas as cores do espectro visível, formando a luz branca. Por meio de experimentos, Newton investigou como os prismas conseguem separar a luz branca em suas cores componentes. Ele apresentou a explicação de que, ao atravessarem o prisma, as partículas de luz sofrem alterações em suas velocidades. Isso se deve à mudança do meio de propagação, passando de um, como o ar, para outro, como o vidro. Essa variação na velocidade provoca mudanças nas trajetórias das partículas de luz, explicando assim a separação da luz branca em suas diferentes cores constituintes. (Darrigol, 2012).

35 - Isaac Newton escreveu uma carta endereçada a Henry Oldenburg, Secretário da Royal Society, em 6 de fevereiro de 1672, que foi lida em sua ausência durante uma sessão da Royal Society em 8 de fevereiro do mesmo ano. O conteúdo da carta foi posteriormente publicado na 80ª edição dos Philosophical Transactions em 19 de fevereiro de 1672, uma das mais antigas revistas científicas ainda em publicação. Após a publicação desta carta, Newton recebeu duras críticas, especialmente de Huygens, Pardies e Hooke. O conteúdo destas controvérsias não será tratado neste texto. Para uma leitura aprofundada sobre o assunto, consulte Darrigol (2012) e Sabra (1981).

36 - A aberração cromática ocorre porque diferentes cores são refratadas em ângulos ligeiramente distintos,

formatos diferentes do esférico³⁷. Neste espírito, comprou um prisma de vidro triangular e, ao se impressionar com as cores produzidas, imediatamente procurou compreendê-las.

Adquiri um prisma de vidro triangular para experimentar os célebres fenômenos das cores. Para tanto, tendo escurecido meu aposento e feito um pequeno orifício nos postigos da minha janela para permitir a entrada de uma quantidade conveniente de luz solar, posicionei meu prisma à sua entrada, de modo que a luz fosse refratada para a parede oposta. Inicialmente, foi um passatempo muito prazeroso observar as cores vivas e intensas produzidas; contudo, após algum tempo dedicando-me a examiná-las mais detalhadamente³⁸, surpreendi-me ao vê-las em uma forma alongada, o que, segundo as leis reconhecidas de refração, esperava que fossem circulares. (Newton, 1672, p.47).

O que surpreendeu Newton foi o formato alongado do espectro solar projetado na parede, cujo comprimento era cerca de cinco vezes maior do que a largura, uma vez que ele esperava um formato circular. Esta expectativa se devia à posição do prisma, ajustado na condição de desvio mínimo para o experimento. Em qualquer outra posição, a imagem alongada como a observada seria a esperada. Portanto, esse foi um experimento cuidadosamente preparado a partir dos seus conhecimentos de óptica geométrica, especialmente a lei do seno para a refração, e não uma observação de um fenômeno ao acaso.

Posteriormente, Newton repetiu o experimento de maneiras ligeiramente diferentes para testar várias hipóteses sobre o fenômeno. Durante todo esse processo, ele considerou implicitamente a validade da lei do seno para a refração, “(...) porque esse cálculo foi baseado na Hipótese da proporcionalidade dos senos de Incidência e Refração (...)” (Newton, 1672, p. 49) . Para todas as possibilidades listadas no Quadro 4, chegou a conclusões negativas.

resultando em bordas coloridas ao redor dos objetos observados por meio de telescópios refratores.

37 - Naquele momento, o desafio era reduzir a aberração cromática em telescópios refratores. Acreditava-se que lentes com formato de seção cônica, em vez de esféricas, poderiam ser a solução para esse problema. Essa era, inclusive, uma sugestão de Descartes. (Sabra, 1981).

38 - Um exemplo claro de busca de superação do obstáculo da experiência primeira.

Quadro 4: Possíveis causas do formato alongado do espectro solar projetado na parede pelo uso de um prisma

Possível Causa Investigada	Resultado da Investigação
<i>Espessura variável do vidro</i>	Transmitindo luz através de partes do vidro de diversas espessuras, não encontrou diferenças significativas que explicassem o fenômeno.
<i>Irregularidades no vidro</i>	Utilizou um segundo prisma para refletir a luz de forma contrária ao primeiro, a fim de neutralizar os efeitos regulares e potencialmente ampliar os irregulares. Descobriu que mesmo com a multiplicidade de refrações, as irregularidades não causavam a forma alongada do espectro, pois a luz retomava uma forma arredondada.
<i>Ângulo de incidência dos raios solares¹</i>	Newton observou que ao girar o prisma em torno de seu eixo, variando sua obliquidade em relação à luz por um ângulo de mais de quatro ou cinco graus, as cores projetadas na parede não eram sensivelmente deslocadas, indicando que a variação do ângulo de incidência por si só não alterava significativamente a quantidade de refração.
<i>Movimento curvo dos raios após a trajetória pelo prisma²</i>	Newton inicialmente suspeitou que, após a passagem pelo prisma, os raios de luz poderiam mover-se em linhas curvas, influenciados por um possível movimento circular adquirido durante a refração. Inspirado pelo movimento de uma bola de tênis golpeada obliquamente com uma raquete, ele considerou que os raios, se fossem corpos globulares, poderiam ter um comportamento similar. No entanto, após exame cuidadoso, não observou tal curvatura nos raios de luz.
<i>Influência da terminação com sombra ou escuridão</i>	Investigou se sombras ou áreas escuras afetavam a dispersão da luz. Testou com orifícios de diferentes tamanhos e posicionamentos, inclusive em área externa, mas descartou como causa significativa.

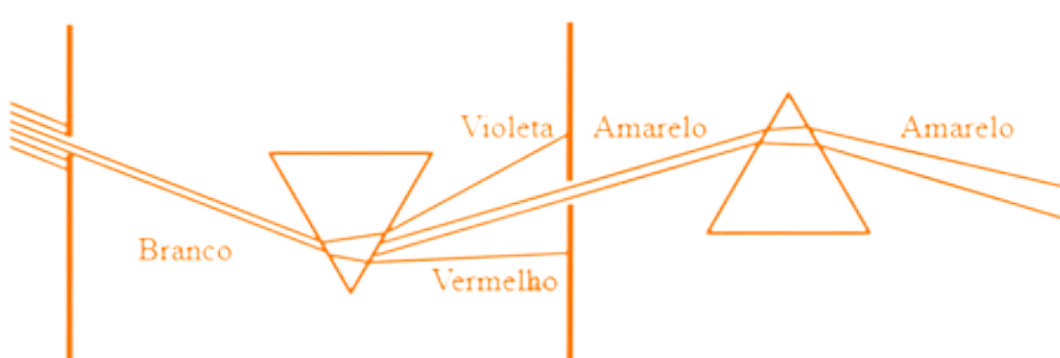
1 - Newton também avaliou se a incidência de raios provenientes de diferentes partes do Sol alteraria a figura alongada observada. A título de curiosidade sobre os aspectos técnicos de montagem e execução deste experimento, segue uma descrição de Newton. As unidades de medida foram convertidas do sistema imperial, usado no original, para o sistema métrico: "Então prossegui a examinar mais criticamente o que poderia ser afetado pela diferença na incidência dos Raios vindos de diferentes partes do Sol. E para esse fim medi as várias linhas e ângulos pertencentes à imagem. Sua distância do buraco ou Prisma era de aproximadamente 6,7 metros; seu comprimento máximo era de 33,7 centímetros; sua largura era de 6,7 centímetros; o diâmetro do buraco era de 0,6 centímetros; os raios que se dirigiam ao meio da imagem formavam um ângulo de 44 graus e 56 minutos com as linhas em que teriam avançado sem refração. E o ângulo vertical do Prisma, 63 graus e 12 minutos". (Newton, 1672, p. 49).

2 - Claramente, pretendendo examinar uma hipótese cartesiana (Sabra, 1981).

Fonte: Adaptado de Newton, 1672

Newton então realizou o que ele chamou de *experimentum crucis*, utilizando dois prismas, duas fendas e um anteparo, conforme ilustrado na Figura 10. A primeira fenda estava posicionada próxima a um orifício em uma tábua no postigo da janela, que permitia a entrada direta de um feixe de luz solar do exterior. Este feixe atravessava o orifício e era imediatamente desviado por um prisma colocado logo atrás da tábua, que dividia a luz em seu espectro de cores componentes. Aproximadamente 3,6 metros adiante, uma segunda tábua, também com um orifício e alinhada de modo a permitir a passagem de apenas parte do espectro de luz do primeiro prisma, filtrava certas cores para observação isolada. Um segundo prisma, localizado atrás desta segunda tábua, refratava novamente o feixe de luz. As cores refratadas eram então projetadas em uma parede, que servia de anteparo.

Figura 10: Representação esquemática do experimentum crucis de Newton³⁹



Adaptado de: <https://www.oreilly.com/library/view/experiment-planning-implementing/9781118311011/OEBPS/c02-sec1-0003.htm>

Este arranjo permitiu que Newton selecionasse uma cor específica com o primeiro prisma, girando-o em torno de seu eixo, e a incidisse no segundo prisma para uma segunda refração. A partir dessa configuração, ele observou que diferentes cores eram projetadas em posições distintas na parede. Newton interpretou esse fenômeno como resultado de diferentes graus de refrangibilidade associados a cada cor.

39 - As figuras que aparecem em muitos livros e sites, mostrando a dispersão da luz branca por prismas, cometem quatro erros: (i) não existe dispersão visível na primeira refração; (ii) a abertura exagerada da luz dispersa; (iii) a individualização das cores da luz dispersa; (iv) só é possível ver a dispersão da luz se ela for projetada em um anteparo.

E eu vi, pela variação desses lugares [em que cada cor é projetada na parede], que a luz, dirigindo-se àquela extremidade da imagem, para onde a refração do primeiro prisma foi feita, sofria no segundo prisma uma refração consideravelmente maior do que a luz dirigindo-se à outra extremidade. E assim, a verdadeira causa do comprimento dessa imagem foi detectada como não sendo outra senão que a luz consiste em raios diferentemente refratáveis, que, sem qualquer respeito a uma diferença em sua incidência, eram, de acordo com seus graus de refrangibilidade, transmitidos para diversas partes da parede. (Newton, 1672, p. 51).

À primeira vista, o *experimentum crucis* de Newton parece tratar apenas de um fenômeno de cores; contudo, o aspecto mais crucial relacionava-se à refrangibilidade dos raios de luz (Sabra, 1981). Até então, acreditava-se que todos os raios solares possuíam igual refrangibilidade, o que levou Newton a esperar uma imagem circular, não alongada. Também era comum na época a noção de que o prisma modificava a luz ao produzir cores que antes não existiam. No entanto, seu experimento permitiu-lhe afirmar que “As cores não são qualificações da Luz, derivadas de Refrações ou Reflexões de corpos naturais (como geralmente se acredita), mas propriedades originais e inatas, que são diversas em diferentes Raios” (Newton, 1672, p. 53).

Para complementar suas conclusões, Newton realizou um segundo experimento em que raios solares dispersos por um prisma eram posteriormente convergidos, resultando na recuperação da luz branca. Dessa observação, ele concluiu que a luz branca “é um agregado confuso de Raios dotados de todos os tipos de Cores⁴⁰, conforme são lançados indiscriminadamente das várias partes dos corpos luminosos” (Newton, 1672, p. 55). Neste contexto, ele explica como a luz branca interage com os corpos para conferir-lhes

40 - Alguns pesquisadores, como Newman (2010), argumentam que a interpretação de Newton do *experimentum crucis* foi influenciada pela tradição alquímica e pelas ideias corpusculares de Boyle. Segundo essa visão, os componentes da luz branca, embora misturados, mantinham suas identidades inalteradas e podiam ser isolados novamente em suas formas originais. Essa noção reflete a prática alquímica de decomposição e recomposição de substâncias sem a perda ou alteração de suas propriedades essenciais. A perspectiva de Newton contrastava fortemente com as ideias do escolasticismo, dominadas pelas teorias aristotélicas sobre a mistura. No escolasticismo, especialmente na interpretação tomista, a mistura de elementos resultava em uma substância homogênea, onde as formas originais dos componentes eram destruídas. Portanto, os elementos que compunham a mistura não podiam ser recuperados em sua forma original, uma vez que acreditava-se que suas qualidades essenciais e identidades substanciais haviam sido transformadas.

cor: “as Cores de todos os corpos naturais não têm outra origem senão esta: que eles são variadamente qualificados para refletir um tipo de luz em maior abundância do que outro” (Newton, 1672, p. 56). No Quadro 5 são listadas estas duas ideias e seus argumentos sobre a origem das cores prismáticas.

Quadro 5: Causas e argumentos sobre a origem das cores prismáticas

Causa	Argumentos
<i>As cores são fabricadas pelo prisma.</i>	1. Homogeneidade da luz branca: Se as cores são produzidas pelo prisma, isso implicaria que a luz branca é simples ou homogênea inicialmente. 2. Interação com o prisma: Neste caso, as cores seriam vistas como modificações, confusões ou perturbações da luz branca original, causadas pela interação com o prisma. 3. Dependência do prisma: Sugeriria que sem o prisma, essas cores não existiriam, sendo então um fenômeno dependente do meio de refração.
<i>As cores já existem nos raios desde sua origem.</i>	1. Heterogeneidade da luz branca: A luz branca é um agregado heterogêneo de raios diversos, cada um possuindo uma cor intrínseca. 2. Interação com o prisma: O prisma não cria cores, mas apenas separa os raios já coloridos de acordo com seus diferentes graus de refrangibilidade. 3. Consistência das propriedades dos raios: Experimentos mostram que raios coloridos isolados não mudam de cor ou refrangibilidade ao passar por um segundo prisma, reforçando que as cores são características originais dos raios.

Fonte: O autor

4.4 ANÁLISE EPISTEMOLÓGICA

Os séculos XVII e o início do XVIII marcaram o rompimento com o espírito pré-científico, uma época em que teorias oriundas de especulações míticas não apenas serviam como inspiração ou motivação pessoal para cientistas e filósofos, mas também podiam alcançar o status do que hoje denominaríamos conhecimento científico. Este avanço em direção ao racionalismo contou com a contribuição de diversos personagens históricos, muitos dos quais são mencionados no Quadro 3. Entre eles, Descartes e Newton são especialmente destacados neste capítulo.

A seguir, discutiremos dois pontos cruciais para a compreensão da perspectiva epistemológica deste período: (i) a separação mais clara entre os domínios de influência e objetos de estudo da metafísica e da física; e (ii) como o paradigma científico mais racional, o da *grande máquina*, substituiu seu predecessor. Este novo paradigma, apesar de avançar o conhecimento científico, também trouxe consigo diversos obstáculos epistemológicos que seriam superados na próxima evolução do espírito científico, representada pela mecânica quântica.

A SEPARAÇÃO DAS ABORDAGENS FÍSICA E METAFÍSICA DA ÓPTICA

Trusted (1991) defende a tese de que a metafísica se manifesta de três formas: conjectura especulativa, premissa fundamental e crença mística. Essas categorias são arbitrárias e seus conteúdos podem evoluir, migrando de uma categoria para outra.

Assim, embora conjecturas especulativas possam se tornar teorias empíricas, elas também podem adquirir o status de pressupostos fundamentais; crenças místicas podem ser descartadas como absurdas, mas elas também podem ser aceitas como pressupostos fundamentais. (Trusted, 1991, p. ix).

Conforme o critério popperiano, que define ciência pela capacidade de uma teoria ser falseável⁴¹, uma teoria metafísica originar-se-ia de uma conjectura especulativa infalseável (ibid). Exemplos desta categoria incluem o atomismo de Demócrito e o *plenum*⁴² de Descartes. Neste contexto, Bachelard sustenta que o avanço do conhecimento científico demanda uma crescente racionalização. Para atingir níveis superiores de racionalidade, é essencial superar certos obstáculos epistemológicos. A metafísica, contudo, tem sido um obstáculo persistente, desde as concepções gregas sobre as teorias da visão, representando o obstáculo do conhecimento unitário.

O rompimento com este obstáculo tornou-se evidente no século XVII, começando com a abordagem cartesiana e consolidando-se com Newton, através de sua autodenominada filosofia experimental.

De fato, Newton tinha uma grande aversão às hipóteses mais especulativas; seu objetivo era criar uma teoria baseada diretamente na observação e livre de quaisquer suposições sobre o mecanismo oculto das coisas. “Ele costumava”, diz Maclaurin [discípulo de Newton], “chamar sua filosofia de filosofia experimental, insinuando, pelo nome, a diferença essencial que existe entre ela e aqueles sistemas que são produto apenas do gênio e da invenção.” (Whittaker, 2012, p. lxvii).

Entretanto, Trusted (1991) sustenta que a metafísica, especialmente a metafísica mística que engloba crenças religiosas, não pode ser totalmente eliminada do espírito humano. Além disso, ela argumenta que os efeitos dessas crenças nem sempre são negativos para a evolução da ciência. De fato,

41 - Popper defende que o critério primordial para considerar uma teoria como científica é a falseabilidade. A natureza do desafio à teoria pode ser lógica, experimental ou observacional. Essa capacidade de ser falseada é o que distingue a ciência dos mitos. (Couto, 1996).

42 - O conceito de *plenum* de Descartes é uma aceitação da proposta aristotélica, de que não há vazios. Os escolásticos também partilhavam desta concepção. Por sua vez, a justificativa de Descartes para o *plenum* é de natureza metafísica, ao defender que a extensão do espaço não pode diferir da extensão do corpo (Nolan, 2016).

(...) crenças místicas e religiosas claramente motivaram e inspiraram muitos daqueles que procuraram entender e explicar o mundo físico. Toda ciência pressupõe algum sistema metafísico de crenças, e as crenças místicas têm sido uma parte importante da maioria dos sistemas. (Trusted, 1991, p. xi)

Descartes e Newton são exemplos de gênios movidos pelo desejo transcendental de compreender o universo, ou seja, por uma motivação metafísica. Embora nem todos os aspectos de suas teorias sejam falseáveis, especialmente no caso das teorias cartesianas, Newton intencionalmente procurou desenvolver teorias que pudessem ser falseadas. As teorias de Newton, embora ainda retivessem traços de suas crenças metafísicas, tiveram suas proposições em óptica indubitavelmente superando o obstáculo do conhecimento unitário. Com isso, elevaram o conhecimento de óptica para mais próximo da racionalidade, conforme proposto por Bachelard.

Descartes e Newton, o impasse epistemológico do mecanicismo

Apesar das diferenças entre as abordagens teóricas e experimentais de Descartes e Newton, ambos adotaram a metáfora dominante de sua época, a da grande máquina, que reflete o mecanicismo. “(...) o mecanicismo é um exemplo de cair vítima da metáfora. Descartes e Newton são, para mim, excelentes exemplos (Turbayne, 1974, p. 17)”.

Como resultado deste enquadramento, surgiu uma confusão na interpretação dos dados experimentais de Newton. Em seus experimentos com a formação de cores em placas finas, ele preferiu uma abordagem corpuscular e foi obrigado a introduzir novas modificações na teoria da luz, como os conceitos de “fácil reflexão e refração⁴³”. Por outro lado, a teoria ondulatória de Huygens poderia ter explicado o fenômeno sem a necessidade de novas modificações.

43 - Este tópico não foi abordado neste texto. Para uma análise mais detalhada do assunto, consulte Darrigol (2012) e Sabra (1981).

Conforme proposto por Bachelard, a metáfora está inserida no obstáculo verbal, que, como os demais obstáculos, contribui para a lentidão e até a estagnação do avanço científico. Como exemplo especulativo, podemos citar a lentidão no avanço da teoria ondulatória da luz. Ao descartar deliberadamente esta hipótese, Newton deixou de aplicar seu gênio ao desenvolvimento dessa abordagem teórica. Como exemplo de estagnação, até cerca de um século após as publicações de Newton e Huygens, a perspectiva corpuscular continuou sendo amplamente aceita pela comunidade científica. Contudo, essa preferência deveu-se mais à autoridade de Newton, consolidada após o sucesso do *Principia*, do que a uma análise racional de ambas as teorias.

Sobre Descartes e Newton, Turbayne (1974, p. 19) comenta:

Afinal, seus autores [do mecanicismo] caíram na mesma armadilha que todas as outras vítimas. Depois de inventar suas novas metáforas, e de tê-las usado com grande maestria, aparentemente conscientes do que estavam fazendo, depois se sentiram tão atraídos pelo encanto de sua criação, que confundiram essas interpretações com as coisas interpretadas. Tomaram suas próprias metáforas em sentido literal, seus artifícios pela coisa real. Foi como se tivessem dado um uniforme ao contentamento geral.

Contudo, mesmo que a metáfora da *grande máquina* tenha contribuído para a estagnação do conhecimento científico, é inegável que o seu estabelecimento representou um rompimento significativo com o espírito científico anterior. O mecanicismo substituiu um sistema de compreensão do mundo, transformando o fazer científico e aproximando-o mais da racionalidade.

5.

ONDA, PARTÍCULA,
ONDA-PARTÍCULA

Em toda a história da física, não houve período de transição tão abrupto, tão inesperado e em uma frente tão ampla quanto a década de 1895-1905. (Pais, 1979, p. 871).

5.1 INTRODUÇÃO

Em meados do século XVIII, a teoria corpuscular de Newton explicava muito bem os fenômenos de reflexão e refração ordinária da luz. Contudo, essa teoria enfrentava dificuldades para explicar fenômenos como a dupla refração, a formação de cores em placas finas e a difração da luz por bordas finas, em que se observava “(...) que a luz, de fato, se curva para dentro da sombra geométrica” (Sabra, 1981, p. 283). No início do século XIX, a teoria ondulatória de Huygens, que até então estava praticamente esquecida, começou a ganhar relevância devido ao surgimento de conceitos não desenvolvidos na época de Newton:

Foi então demonstrado que todos os tipos de fenômenos ópticos conhecidos na época podiam ser adequadamente explicados por considerações ondulatórias, utilizando o Princípio de Huygens das ondas secundárias, o princípio da superposição de Young e a ideia da transversalidade das ondas de luz introduzida por Fresnel para explicar os fenômenos de polarização. Assim, a teoria corpuscular de Newton foi deixada de lado, por não oferecer nenhuma explicação para fenômenos de difração, interferência ou polarização que pudesse ser comparada com as convincentes representações matemáticas de Fresnel. (Sabra, 1982, p. 314).

Publicada em 1803, a abordagem de Young explorou os fenômenos de difração e interferência da luz através de experimentos que fizeram interferir dois feixes de fontes distintas. Os resultados desses experimentos produziram padrões de intensidade similares aos padrões de interferência observados em ondas sonoras, levando Young a concluir que a luz possui uma natureza ondulatória e se propaga em um meio etéreo. Apesar disso, sua abordagem foi considerada demasiado qualitativa e não obteve a credibilidade necessária para desafiar o legado de Newton (Caruso e Oguri, 2006).

Em 1826, Fresnel deu um passo adiante ao fornecer uma representação matemática robusta para os resultados experimentais de Young, complementada por novos estudos

sobre difração e transversalidade da luz. Esta nova abordagem, desvinculada da analogia acústica, baseou-se “ (...) no princípio da interferência, no caráter senoidal das vibrações de cores simples, no princípio de Huygens-Fresnel e na forma elipsoidal das ondulações de Huygens em cristais uniaxiais” (Darrigol, 2012, p. 224). Os avanços de Fresnel foram reconhecidos até mesmo por adeptos da teoria de Newton e foram eficazes em rechaçar as críticas anteriormente dirigidas a Young. No entanto, a teoria corpuscular ainda se mantinha como concorrente, frequentemente preservada através de ajustes ad hoc.

Eles [os Newtonianos] lamentaram a ausência de uma fundamentação dinâmica para o princípio de Huygens-Fresnel; negaram a possibilidade de compreensão da polarização sob a perspectiva ondulatória; e especularam que a interferência consiste em uma interação entre raios, e não em um processo ondulatório. (Darrigol, 2012, p. 224).

Em 1850, o experimento de Foucault foi fundamental para a aceitação da teoria ondulatória da luz. O objetivo do experimento era avaliar as hipóteses concorrentes sobre a refração, especificamente testando se a velocidade da luz seria maior em meios mais densos, como sugeria a teoria corpuscular, ou menor, conforme previa a teoria ondulatória. Ao medir a velocidade da luz na água e no ar, Foucault concluiu que a luz se propaga mais lentamente no meio mais denso, corroborando assim a teoria ondulatória.

O impacto desse experimento na mente dos físicos do século XIX foi tal que as tentativas de desenvolver a hipótese corpuscular foram geralmente abandonadas até que Einstein avançasse sua teoria dos fótons em 1905. (Sabra, 1981, p. 315).

O período entre o experimento de Foucault e a revolucionária teoria dos fótons de Einstein foi marcado por avanços significativos na compreensão da natureza da luz. Os principais progressos ocorreram nos estudos sobre ondas eletromagnéticas e sobre a quantização de energia. Esses desenvolvimentos criaram as condições ideais para que, em 1905, Einstein propusesse sua teoria sobre a natureza quântica da luz.

5.2 A UNIFICAÇÃO DA ÓPTICA E DO ELETROMAGNETISMO

A teoria do campo eletromagnético de Maxwell foi publicada em 1873, em seu Tratado sobre *Eletricidade e Magnetismo*⁴⁴. Maxwell faleceu em 1879, enquanto revisava a segunda edição deste tratado. Após sua morte, a responsabilidade de dar continuidade ao seu trabalho foi assumida por um grupo que Hunt (1994) denominou “Maxwellianos”. Esse grupo era composto por G. F. FitzGerald, Oliver Heaviside, Oliver Lodge e, mais tarde, recebeu colaborações de Heinrich Hertz e Joseph Larmor.

A aceitação das ideias de Maxwell, imediatamente após a publicação de seu tratado, foi lenta. Esta lentidão deveu-se à dificuldade de leitura do tratado, que não estava organizado conforme outras publicações científicas da época e era, por vezes, considerado confuso. Esta dificuldade estrutural do texto era agravada pelos conceitos, até então inusitados, descritos por um formalismo matemático carregado (Hunt, 1994).

Os conceitos eram estranhos e a matemática era desajeitada e complexa. A maior parte da base experimental foi retirada das pesquisas de Michael Faraday, cujos resultados eram inegáveis, mas cujas ideias pareciam bizarras para o físico ortodoxo. (Williams, 1994, p. ix)

A apresentação moderna da teoria de Maxwell, que inclui suas quatro equações, a geração e detecção de ondas eletromagnéticas, e a descrição dos fenômenos de reflexão e refração, foi alcançada após um grande esforço intelectual dos Maxwellianos. Neste contexto, Heaviside chegou a declarar que “Maxwell era apenas 1/2 Maxwelliano” (Heaviside para FitzGerald, 1895, FG-RDS apud Hunt, 1994, p. 3).

As implicações para a óptica começaram quando Maxwell considerou um sistema imaginário de vórtices moleculares, inicialmente proposto por Thomson, com o objetivo de simular fenômenos eletromagnéticos. Esse é o conhecido modelo mecânico do campo eletromagnético, discutido em seu *Sobre Linhas Físicas de Força*, publicado entre 1861 e 1862 (Maxwell, 1890). A partir desse modelo, Maxwell chegou a duas conclusões importantes:

44 - A sua importância para o eletromagnetismo é comparada ao Principia para a mecânica clássica.

a primeira derivou o seu conceito chave de correntes de deslocamento; a segunda, que as ondas que se propagavam nesse meio tinham uma velocidade quase exatamente igual à da luz, levando-o a inferir que a luz consiste em ondas eletromagnéticas (Hunt, 1994).

Maxwell considerava essa unificação da óptica e do eletromagnetismo como talvez sua descoberta mais importante, e ele estava ansioso para baseá-la em algo menos hipotético do que seu modelo [de vórtices moleculares]. (Hunt, 1994, p. 12).

Em 1864, no trabalho *Uma Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético* (Maxwell, 1890), Maxwell adota uma abordagem mais abstrata do mesmo fenômeno, independente do seu modelo mecânico anterior⁴⁵. Neste estudo, ele desenvolveu vinte equações com vinte variáveis, que ele próprio denominou de “Equações Gerais do Campo Eletromagnético”. Essas equações expressaram matematicamente praticamente tudo que era conhecido na época sobre eletricidade e magnetismo. Por meio dessas equações, Maxwell essencialmente resumiu o trabalho de Hans C. Ørsted (1777-1851), Karl F. Gauss (1777-1855), André-Marie Ampère (1775-1836), Michael Faraday (1791-1867) e outros, e adicionou seu próprio conceito radical de “corrente de deslocamento” para completar a teoria.” (Sengupta e Sarkar, 2003, p. 14). O quadro abaixo apresenta a nomenclatura adotada por Maxwell.

Com isso, Maxwell reafirmou a unificação da óptica com o eletromagnetismo:

Quadro 6: Equações gerais de Maxwell

Nome da variável usada por Maxwell (Nome equivalente moderno)	Símbolo usado por Maxwell	Equivalente moderno
Momento eletromagnético (Vetor potencial magnético)	F, G, H	$\vec{A}$
Força magnética (Intensidade do campo magnético)	α, β, γ	$\vec{H}$
Força eletromotriz (Intensidade do campo elétrico)	P, Q, R	$\vec{E}$

45 - Maxwell, assim como seus contemporâneos, acreditava na existência de um meio mecânico para a propagação das ondas eletromagnéticas, denominado de éter luminífero. Neste caso, Maxwell procura se distanciar do modelo de vórtices moleculares, mas não abandona a existência do éter. Em 1887, Michelson e Morley (1887) realizariam o experimento confirmando que a velocidade da luz é constante em todos os referenciais inerciais, invalidando a teoria do éter.

Corrente devido à condução verdadeira (Densidade de corrente)	p, q, r	$\vec{J}$
Deslocamento elétrico (Densidade de fluxo elétrico)	f, g, h	$\vec{D}$
Corrente total incluindo variação de deslocamento (Condução mais densidade de corrente de deslocamento)	$\begin{cases} p^l = p + \frac{df}{dt} \\ q^l = q + \frac{dg}{dt} \\ r^l = r + \frac{dh}{dt} \end{cases}$	$\vec{J}_T$
Quantidade de eletricidade livre (Densidade volumétrica de carga elétrica)	e	ρ
Potencial elétrico (Potencial elétrico)	ψ	ϕ

Fonte: Traduzido e adaptado de Sengupta e Sarkar (2003, p. 14)

As equações gerais são então aplicadas ao caso de uma perturbação magnética propagada através de um campo não condutor, e demonstra-se que as únicas perturbações que podem ser assim propagadas são aquelas que são transversais à direção de propagação, e que a velocidade de propagação é a velocidade v , encontrada a partir de experimentos como os de Weber, que expressa o número de unidades eletrostáticas de eletricidade contidas em uma unidade eletromagnética.

Essa velocidade é tão próxima à da luz, que parece que temos fortes razões para concluir que a própria luz (incluindo calor radiante e outras radiações, se houver) é uma perturbação eletromagnética na forma de ondas propagadas através do campo eletromagnético de acordo com as leis eletromagnéticas. (Maxwell, 1890, p. 535).

5.3 A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO

No final do século XIX, o consenso científico consolidou a teoria de Maxwell sobre o campo eletromagnético. Segundo essa teoria, o campo eletromagnético, incluindo a luz, era considerado uma distribuição contínua de energia no espaço, ou seja, a luz era descrita por funções contínuas. Estas, por definição, contrastavam com a descrição de outros fenômenos, como a energia da matéria, que é composta pela soma de átomos e elétrons. Essa visão começou a ser questionada com o surgimento das primeiras discussões sobre o

que viria a ser a mecânica quântica. Em um curto período de tempo, diversas descobertas, como as mencionadas no Quadro 6, reviveram questionamentos sobre a natureza da luz que até então eram considerados resolvidos.

Durante as primeiras décadas da era quântica, a posição da maioria dos físicos teóricos era que a descrição contínua convencional do campo de radiação livre deveria ser protegida a todo custo e que os enigmas quânticos relacionados à radiação deveriam, eventualmente, ser resolvidos por uma revisão das propriedades da interação entre radiação e matéria. (Pais, 1979, p. 891).

Quadro 7: Principais avanços na física no período 1887-1905

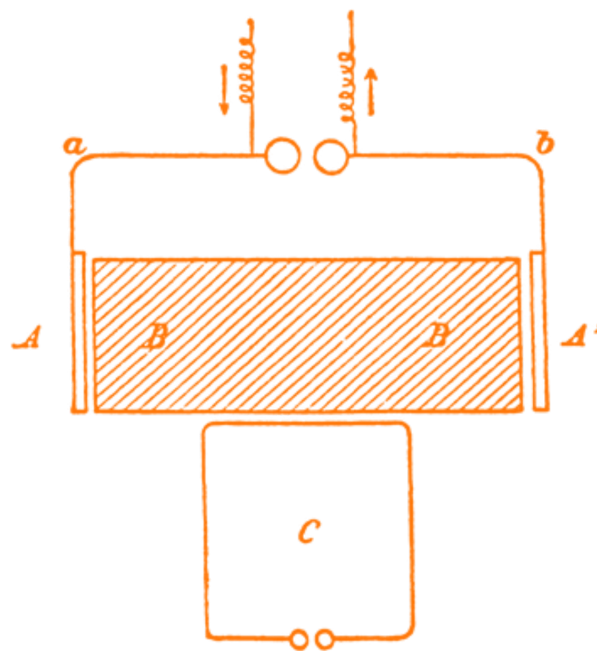
Ano	Cientista	Descoberta/Teoria
1887	Heinrich Hertz	Descoberta do efeito fotoelétrico
1895-1898	Wilhelm Röntgen	Descoberta dos Raios-X
1896	Henri Becquerel	Descoberta da Radioatividade Natural
1897	J.J. Thomson	Descoberta do Elétron
1900-1901	Max Planck	Teoria da quantização da energia
1905	Albert Einstein	Teoria do efeito fotoelétrico e teoria da relatividade especial

Fonte: Adaptado de Jordan (s.d.)

Em 1887, Hertz publicou pela primeira vez suas observações sobre o efeito fotoelétrico, uma descoberta que ocorreu acidentalmente enquanto estudava a natureza eletromagnética da luz. O experimento envolvia um ressonador, originalmente projetado para estudos de polarização em dielétricos por meio de ondas eletromagnéticas, cujo desenho pode ser visto na Figura 11. Durante os experimentos, Hertz notou que uma faísca intensa gerava uma segunda faísca mais tênue em outra placa metálica. Ao bloquear a incidência de luz na segunda placa para observar melhor a faísca, ele percebeu que a faísca se tornava ainda mais tênue, um resultado inesperado. Após testar proteções isolantes e condutoras, que tive-

ram efeito imperceptível na intensidade da faísca secundária, Hertz concluiu que o efeito não era de natureza eletrostática. Ele então suspeitou que a luz emitida pela primeira faísca poderia estar influenciando o fenômeno. Experimentou bloquear a luz com diferentes materiais e aumentar sua intensidade com uma lâmpada de arco, chegando à conclusão (não totalmente exata) de que o fenômeno observado era causado pela luz ultravioleta (Buchwald, 1994).

Figura 11: Desenho original do ressonador utilizado por Hertz para estudar efeitos de polarização em dielétricos (B)



Fonte: Hertz [1893] 1962 apud Buchwald, 1994, p. 243

A descoberta do efeito fotoelétrico por Hertz foi publicada como um fenômeno que exigia uma explicação. Após essa publicação, vários cientistas começaram a explorar o efeito fotoelétrico experimentalmente. O Quadro 7 resume os principais avanços até a formulação da teoria por Einstein em 1905 e sua subsequente confirmação por Millikan em 1915.

Quadro 8: Explorações sobre o efeito fotoelétrico após o experimento de Hertz

Ano	CIENTISTA	DESCOBERTA
1888	Wilhelm Hallwachs	Demonstrou que a irradiação com luz ultravioleta faz corpos metálicos não carregados adquirirem carga positiva.
1899	J. J. Thomson	Foi o primeiro a afirmar que o efeito fotoelétrico induzido por luz ultravioleta consiste na emissão de elétrons, descobertos em 1897. Utilizou técnicas de câmara de nuvens para determinar a carga dos elétrons.
1902	Philip Lenard	Usou uma luz de arco de carbono como fonte e descobriu que a energia dos elétrons não depende da intensidade da luz, mas sim da frequência da luz.
1905	Albert Einstein	Propôs uma explicação teórica para o efeito fotoelétrico, onde um quantum de luz transfere toda a sua energia para um único elétron.
1915	Robert Millikan e outros	Millikan conduziu experimentos que confirmaram a equação de Einstein com alta precisão e ajudou a estabelecer a constante de Planck. Duane e Hunt descobriram o limite Duane-Hunt em experimentos com raios-X, o que também apoiou a teoria de Einstein.

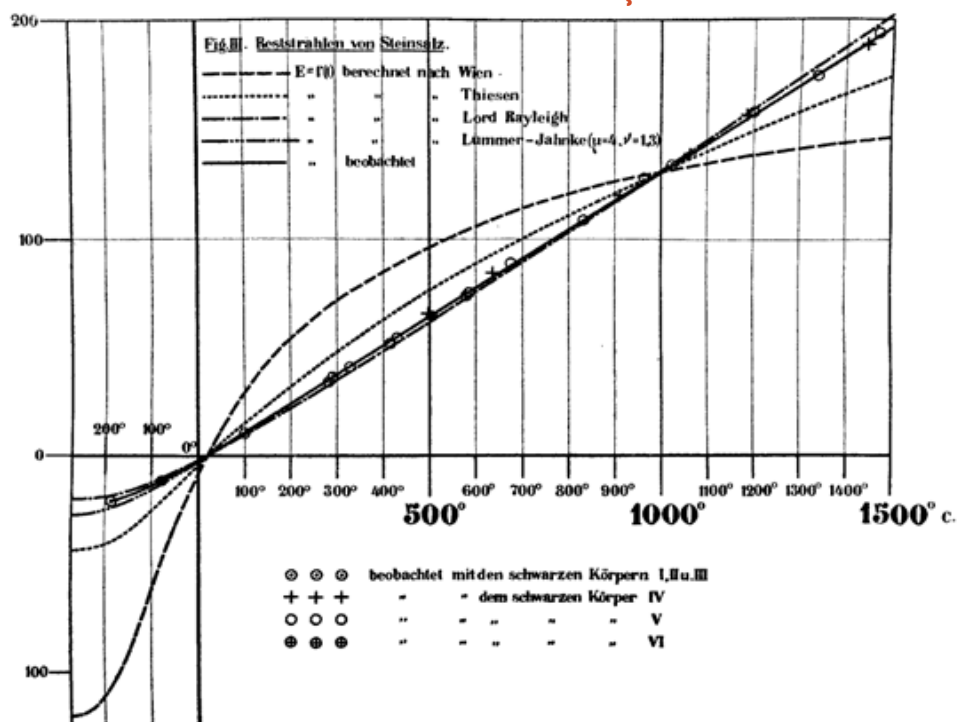
Fonte: Adaptado de Pais (1979, p. 876)

5.4 A SOLUÇÃO DE PLANCK PARA A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Por volta de 1900, o desafio teórico e experimental na física concentrava-se em medir a radiação de corpo negro e desenvolver uma teoria que se ajustasse aos dados experimentais⁴⁶. Diversos grupos trabalhavam em paralelo, buscando técnicas para emitir e medir a radiação em várias faixas do espectro, especialmente na região desafiadora do infravermelho distante. A Figura 12 mostra diversos modelos de ajustes para os dados experimentais de radiação de corpo negro então disponíveis.

46 - "De 1859 a 1926, esse problema permaneceu na fronteira da física teórica, inicialmente em termodinâmica, depois em eletromagnetismo, em seguida na antiga teoria quântica e, finalmente, em estatística quântica". (Pais, 1979, p. 871).

Figura 12: Amostra dos dados de Rubens e Kurlbaum que levaram Planck a deduzir sua fórmula de radiação



Fonte: Rubens e Kurlbaum, 1900 apud Pais, 1979, p. 869

Planck dedicava-se ao problema da radiação de corpo negro principalmente através de uma abordagem teórica, apoiado por sua vasta experiência em soluções de primeiros princípios. Em 1889, ao assumir o cargo de professor titular em Berlim⁴⁷, teve acesso ao laboratório mais avançado do mundo para o estudo da radiação de corpo negro, o Physikalisch Technische Reichsanstalt. Em dezembro de 1900, Planck publicou sua abordagem para o problema, considerada o marco inicial da mecânica quântica. Ele propôs a quantização do campo eletromagnético⁴⁸, aplicando uma ideia de “degraus” termodinâmicos e

47 - “Kirchhoff [que inaugurou a pesquisa em radiação de corpo negro] havia se mudado de Heidelberg para Berlim [para atuar na Humboldt University of Berlin] para assumir a cátedra de física teórica. Após sua morte, essa posição foi oferecida a Boltzmann, que recusou. Em seguida, Heinrich Hertz (1857-1894) foi abordado; ele também recusou. O próximo candidato foi Planck, a quem foi feita a oferta de extraordinarius (professor associado). Planck aceitou e logo foi promovido a professor titular.” (Pais, 1979, p. 868).

48 - Uma das consequências desta abordagem de Planck é obtenção da equação $\epsilon=h\nu$, em que ϵ é um elemento finito de energia, h é uma constante (de Planck) e ν é a frequência da onda eletromagnética.

estatísticos à curva que descrevia a distribuição de energia da radiação de corpo negro⁴⁹. Este método, que dividia N elementos de energia indistinguíveis entre N osciladores distinguíveis (os osciladores de Planck), era controverso tanto estatisticamente — pois dependia de hipóteses que ele mesmo questionava — quanto conceitualmente, por considerar a quantização física dos estados de energia⁵⁰. Apesar das dúvidas conceituais, Planck conseguiu ajustar os dados experimentais da radiação de corpo negro. (Pais, 1979).

5.5 A HIPÓTESE DO QUANTUM DE LUZ

Em 1905, já era conhecido que o efeito fotoelétrico consistia na emissão de elétrons por luz ultravioleta, e que a intensidade desta emissão dependia da frequência da radiação incidente, e não de sua intensidade. Quanto aos desenvolvimentos teóricos para descrever a radiação de corpo negro: i) havia a proposta de Planck, que estava em acordo com os dados experimentais, mas carecia de um fundamento teórico sólido; ii) e a proposta de Einstein, que estava alinhada com a mecânica estatística clássica e o eletromagnetismo, mas não se ajustava aos dados experimentais (Pais, 1979). Para resolver essas inconsistências, Einstein recorreu à termodinâmica, explorando a relação entre a entropia e o volume de um gás ideal. Isso o levou a derivar uma equação cuja interpretação resultou na *hipótese do quantum de luz*, apresentada em seu artigo de 1905, *On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light* (Einstein, 1905).

A partir disso, concluímos ainda: a radiação monocromática de baixa densidade (dentro do alcance de validade da fórmula de radiação de Wien) se comporta termodinamicamente como se consistisse de quanta de energia mutuamente independentes de magnitude $R\beta v/N$. (Einstein, 1905, p. 97).

.....
49 - A descrição apresentada nesta seção procura evidenciar a evolução conceitual aplicada ao problema. Para uma excelente introdução matemática com argumentos físicos sugerimos a leitura de Pais (1979).

50 - Em 1906, Einstein (1906b apud Pais, 1979, p. 875) diria que “A teoria de Planck faz uso implícito da (...) hipótese do quantum de luz.”

No mesmo artigo, Einstein avançou ainda mais na interpretação dos seus resultados, sugerindo que a interação entre radiação e matéria também deveria estar sujeita a processos quantizados⁵¹. Ele propôs: “(...) então é sugestivo indagar se as leis de geração e conversão de luz também são constituídas como se a luz consistisse de quanta de energia desse tipo” (Einstein, 1905, p. 98). Com isso, Einstein substituiu as funções espaciais contínuas do campo eletromagnético por um meio discreto composto de quanta de energia.

A partir de suas equações e interpretações, Einstein propôs uma explicação para o efeito fotoelétrico. Ele considerou o caso mais simples, no qual um fóton transmitiria toda sua energia a um elétron, assumindo que os eventos de transferência de energia fossem independentes entre si. Essa abordagem resultou na formulação da equação $E_{\text{max}} = h\nu - W$, onde ν é a frequência da radiação monocromática incidente e W é a função trabalho necessária para que o elétron escape para a superfície. Esta equação estava em concordância com as observações de Lenard em 1902 (ver Quadro 7) (Einstein, 1905). Além disso, diversas outras consequências surgiram a partir desta proposta, conforme indicado no Quadro 8.

Quadro 9: Consequências da equação $E_{\text{max}} = h\nu - W$

1905
- E deve variar linearmente com ν .
- A inclinação do gráfico (E, ν) é uma constante universal, independente da natureza do material irradiado.
- O valor da inclinação foi previsto como sendo a constante de Planck.
- A frequência da luz na fotoluminescência não pode exceder a frequência da luz incidente (regra de Stokes)
- Na fotoionização, a energia do elétron emitido não pode exceder $h\nu$, onde ν é a frequência da luz incidente.
1906
- Discussão da aplicação ao efeito fotoelétrico inverso (efeito Volta).
1909
- Tratamento da geração de raios catódicos secundários por raios X.
1911
- Previu o limite de alta frequência em Bremsstrahlung.

Fonte: Adaptado de Pais, 1979, p. 876-877

51 - Esta interpretação, em especial, rendeu o prêmio Nobel para Einstein em 1921.

Embora diversos experimentos tenham corroborado as previsões de Einstein, a aceitação da realidade física do fóton foi lenta dentro da comunidade científica. Einstein chegou a afirmar em uma carta para M. Besso, em 1918: “Não tenho mais dúvidas sobre a realidade dos quanta de luz — embora ainda esteja bastante sozinho nesta convicção”. (Einstein, 1918 apud Brush, 2007, p. 227). Além disso, é muito provável que, até a publicação da descoberta do efeito Compton⁵² em 1923, praticamente todos os físicos rejeitassem essa hipótese (Brush, 2007).

As investigações acerca das peculiaridades do comportamento eletromagnético da luz, especialmente na radiação de corpo negro, contribuíram para o reconhecimento do seu caráter corpuscular. A hipótese do quantum de luz gerou controvérsias, o que motivou um grande esforço para testá-la experimentalmente. À primeira vista, atribuir momento à luz, uma propriedade tipicamente corpuscular, pode parecer um retorno à teoria corpuscular original de Newton. No entanto, um olhar mais atento revela a complexidade das proposições apoiadas nas teorias termodinâmica, estatística, eletromagnética e na mecânica quântica em sua gênese, todas submetidas à intuição de Einstein. Estes aspectos, estimulando ou sendo estimulados por construções experimentais em pleno desenvolvimento, ávidas por acompanhar os avanços teóricos repentinos daquele período, demonstram a necessidade de uma abertura intelectual para mudanças profundas na estrutura da natureza. Isso significava transformar funções contínuas de energia em distribuições espaciais discretas, e assumir a sua realidade física, não de um ou de outro, mas de ambos. Já em 1909, Einstein previa essa natureza de *complementaridade* e estava disposto a abraçá-la:

Eu já tentei anteriormente mostrar que nossas atuais bases da teoria da radiação têm que ser abandonadas... na minha opinião, a próxima fase no desenvolvimento da física teórica nos trará uma teoria da luz que pode ser interpretada como uma espécie de fusão entre a teoria ondulatória e a teoria da emissão... [a] estrutura ondulatória e [a] estrutura quântica... não devem ser consideradas mutuamente incompatíveis... parece decorrer da lei de Jeans que teremos que modificar nossas teorias atuais, e não abandoná-las completamente. (Einstein, 1909 apud Pais, 1979, p. 878).

.....
52 - O efeito Compton permitiu avaliar a conservação de momento e energia na interação do fóton com um elétron. Enquanto que o efeito fotoelétrico permitia apenas a análise da transferência de energia. Neste sentido, era uma evidência mais forte para a hipótese do quantum de luz. (Brush, 2007).

Contudo, naquele momento, esta era a proposta de um homem só. Seus contemporâneos ainda debatiam as implicações da existência do fóton. Mesmo Einstein, posteriormente em 1923, mostrou-se incrédulo com relação à hipótese de ondas de matéria, considerando a dualidade onda-partícula como uma descrição abstrata e não como uma propriedade fundamental da natureza (Pais, 1979).

5.6 AS ONDAS DE MATÉRIA

Em 1923, de Broglie, influenciado pelos trabalhos de Einstein, publicou dois estudos sobre ondas de matéria. Nestes trabalhos, de Broglie defende que a dualidade onda-partícula se aplica também à matéria em geral, e especialmente aos elétrons.

Após longa reflexão em solidão e meditação, tive subitamente a ideia, durante o ano de 1923, de que a descoberta feita por Einstein em 1905 deveria ser generalizada, estendendo-a a todas as partículas materiais e, notavelmente, aos elétrons. (de Broglie, 1963 apud Pais, 1979, p. 898).

Ou seja, ao validar a relação $E=hf$ para os elétrons, associou-se a eles uma onda, cujos efeitos poderiam ser verificados por experimentos de difração⁵³. Entre 1924 e 1925, Einstein retomou seu estudo da equação que havia desenvolvido para descrever a emissão de radiação de corpo negro. Esta equação, composta pela soma de dois termos — um com caráter corpuscular e outro ondulatório —, mostrou-se válida também para um gás molecular quântico, levando-o a investigar as consequências do termo ondulatório. A partir dessa investigação, Einstein sugeriu a existência de um processo radioativo associado ao gás. A interpretação do termo ondulatório foi esclarecida quando Einstein associou o campo ondulatório de de Broglie às flutuações de energia do gás quântico, abordagem que passou a ser conhecida como estatística de Broglie-Einstein (Pais, 1979; Beller, 1992).

53 - Estas ideias de de Broglie faziam parte da sua tese de doutoramento, cujo examinador era Paul Langevin. Antes de aceitar o trabalho, Langevin encaminhou uma cópia para Einstein, que ficou impressionado. É interessante notar que Einstein também havia chegado na mesma conclusão, por caminhos diferentes, um pouco antes de ter acesso ao trabalho de de Broglie. (Pais, 1979).

Schroedinger, inspirado pela proposta de de Broglie e Einstein, optou por uma abordagem sutilmente diferente. Ele começou descrevendo o gás por meio de uma representação ondulatória e aplicou um processo de quantização distinto, conforme proposto por Debye. Segundo Schroedinger, “Isso não significa nada além de levar a sério a teoria de ondas de de Broglie-Einstein para partículas em movimento.” (Schroedinger, 1926 apud Pais, 1979, p. 899). Em 1926, sua equação para o átomo de hidrogênio foi publicada, marcando o nascimento da mecânica ondulatória.

5.7 ANÁLISE EPISTEMOLÓGICA

A natureza da luz, ou apenas... luz, passou por diversas e profundas compreensões conceituais. As primeiras discussões na antiguidade grega a consideravam como parte inseparável do processo de visão. Os estudos sobre a anatomia do olho, a geometria da visão e os primeiros experimentos em formação de imagens conceberam à luz uma “vida própria”. Existindo, de que seria constituída a luz? De pressão transmitida por matéria (elástica?) contígua, de ondas como as da superfície de um lago ou o som, ou de partículas de diferentes massas em movimento translacional e rotacional, ou ainda de nem uma coisa nem outra, mas onda e partícula de uma maneira nova, diferente e maior do que a sua soma?

A intuição de Einstein e conhecimento aproximado

O final do século XIX e início do XX estabeleceram o conceito de luz como é compreendido atualmente. Contudo, isso não significa que seja um conceito definitivo; ainda existem questões conceituais não resolvidas, especialmente na fronteira quântica. A intuição de Einstein, que percebia a descrição quântica da matéria (e da luz) como uma descrição abstrata e não uma propriedade fundamental da natureza, ainda persiste. Os conceitos de “realidade” e “localidade” parecem ser os equivalentes modernos para o problema de corpo negro. Existem grupos que acreditam na realidade física dos conceitos

de não-localidade, nos efeitos de superposição e na teleportação. Em paralelo, há grupos que procuram unir a física clássica com a quântica para resolver os problemas conceituais introduzidos pela teoria mais recente (Roychoudhuri, Kracklauer e Creath, 2019).

Segundo Bachelard, a mecânica quântica implica um rompimento com o pensamento expresso pelo cartesianismo e todos os outros sistemas anteriores, cujas metafísicas buscavam uma realidade substancial, imutável e irreduzível. O maior exemplo dessa realidade é expresso pelo conceito de átomo, a unidade última da matéria, indivisível. A partir do átomo e da matéria em movimento, seria possível descrever todas as leis universais, avançando *quantitativamente* dos sistemas mais simples para os mais complexos.

O pensamento quântico, qualificado por Bachelard como exemplo do *novo espírito científico*, transforma a lógica de evolução dos sistemas físicos teóricos de uma abordagem quantitativa para uma *qualitativa*. Essa mudança representa a superação de um obstáculo epistemológico, que consistia em “descobrir substâncias últimas e imutáveis que determinam a realidade física, ou em adquirir certeza absoluta sobre elas” (Rizo-Patron et al, 2017, p. 240). Anteriormente, partia-se do simples (átomo e movimento) para descrever o complexo; agora, apresentam-se “relatos sintéticos abertos das relações complexas das quais fenômenos aparentemente simples surgem” (ibid., p. 240).

Neste contexto, o cientista moderno reconhece o *conhecimento aproximado* como produto inevitável da nova ciência. Em vez da precisão absoluta em suas teorias e métodos experimentais,

(...) essa maneira de trabalhar reconhece que os métodos de pesquisa e instrumentos — o que Bachelard identifica como “fenomenotécnica” — determinam as formas que a realidade gradualmente adota para nós no curso de sua investigação (ibid., p. 240).

PORTANTO, SEJA BEM-VINDO À MÁQUINA

O olho, outrora considerado o principal responsável pelos fenômenos ópticos, agora é apenas um espectador na evolução do conceito de luz. Espectador porque já não faz parte do quadro conceitual da luz; de fato, pode-se questionar que luz ele vê e que luz não vê, quais aspectos da luz ele pode perceber ou não. Nesse sentido, o olho, que antes via tudo, bastando a intenção do observador, agora percebe-se cego para a maior parte do espectro eletromagnético e mostra-se como um sensor inútil para apreender as qualidades que definem o quantum de luz.

Bachelard, que viveu de 1884 a 1962, tem sua doutrina epistemológica profundamente enraizada na ciência desenvolvida durante esse período. Ele criou o conceito de fenomenotécnica para incluir, especialmente, os avanços obtidos pela mecânica quântica. A ideia central da fenomenotécnica reside em como o objeto de estudo da ciência é definido. No caso da mecânica quântica, que abrange o fóton, surge um novo paradigma. Na visão de Bachelard, “a ciência contemporânea mostrou que não faz sentido falar de objetos científicos como se fossem independentes do observador” (Chimisso, 2016, p. 142).

O olho humano, como sensor de luz, foi substituído por aparatos tecnológicos que, de forma inédita e inevitável, interferem com o sistema observado. O cientista explora as propriedades dos fótons e os novos fenômenos ópticos apenas por meio dos aparatos tecnológicos desenvolvidos para esse fim. Agora, o fenômeno existe porque o equipamento o produz; as propriedades são observadas porque o equipamento as registra, ou ainda, registra o produto de sua interação com o fenômeno. O olho humano foi substituído por algo mais complexo — as máquinas que precisam ser dissecadas e compreendidas, existindo teorias dedicadas a elas.

Neste sentido, o estudo do objeto quântico é técnico, pois ele só pode ser realizado por meio de um aparato experimental. Esta é a fenomenotécnica, que determina a natureza do conhecimento na física moderna.

G.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O texto abordou de forma abrangente a evolução histórica da óptica, destacando sua conexão com os obstáculos e as rupturas epistemológicas descritos por Gaston Bachelard. Desde os primórdios, na Antiguidade Clássica, a óptica era predominantemente uma teoria da visão, influenciada pelas concepções culturais e filosóficas da época. O animismo e o substancialismo são evidentes nas explicações gregas, como o fogo visual e o pneuma estoico, que ilustram uma forte intuição pelo concreto e pelo contato direto entre o olho e os objetos. Esses conceitos, embora limitados pela ausência de uma abordagem experimental rigorosa, foram essenciais para estabelecer as bases da investigação óptica.

No período medieval, os árabes desempenharam um papel crucial na preservação e no avanço do conhecimento óptico, reinterpretando e refinando as ideias gregas. Alhazém, em particular, realizou uma ruptura significativa ao rejeitar o extromissionismo e propor uma teoria baseada na luz e sua reflexão e refração. Sua abordagem, fundamentada na experimentação, marcou o início da consolidação da óptica como uma ciência autônoma. Durante a Renascença, houve um ressurgimento das teorias geométricas da visão e um avanço nas técnicas de representação, como as projeções lineares e angulares, que ampliaram a compreensão sobre a interação entre luz, objetos e observadores.

Com o advento do racionalismo no período moderno, Descartes e Newton trouxeram uma nova perspectiva à óptica. Descartes descreveu a luz como uma perturbação mecânica, enquanto Newton estabeleceu sua teoria das cores, explicando os fenômenos ópticos com base na decomposição da luz branca. Esses avanços representam a superação de obstáculos epistemológicos como o animismo e o substancialismo, consolidando o mecanicismo como paradigma dominante. A descrição detalhada de fenômenos como reflexão, refração e dispersão evidenciou a transição da óptica para uma ciência mais sistematizada, fundamentada e falseável.

No século XX, a óptica experimentou um novo salto epistemológico com a introdução dos conceitos quânticos. A unificação da óptica com o eletromagnetismo, o estudo do efeito fotoelétrico e a solução de Planck para a radiação de corpo negro redefiniram a compreensão da luz como um objeto dual, simultaneamente partícula e onda. As contribuições de Einstein e Planck não apenas superaram obstáculos epistemológicos anteriores, mas também abriram novas fronteiras para o entendimento da realidade física, alinhando-se à perspectiva ultrarracionalista de Bachelard, que enfatiza a fenomenotécnica e o conhecimento aproximado.

A abordagem histórica adotada no texto mostra que o progresso na ciência é um processo dinâmico, impulsionado pela superação de concepções espontâneas e pela adoção de metodologias rigorosas. A escolha de situar a evolução da óptica no contexto dos obstáculos epistemológicos de Bachelard oferece uma visão crítica e reflexiva sobre o desenvolvimento do conhecimento científico, destacando a importância de entender os contextos históricos e culturais para superar resistências e ampliar os horizontes da racionalidade.

Essa trajetória histórica não apenas recupera o passado da ciência, mas também propõe uma ferramenta didática valiosa, especialmente para a formação de professores. Ao articular a evolução dos conceitos ópticos com uma perspectiva epistemológica, o texto promove uma compreensão mais profunda do caráter transformador da ciência, que continuamente revisita e reinterpreta suas próprias bases. Assim, reforça-se a ideia de que o conhecimento científico é uma construção humana, sempre em diálogo com o presente e o passado, e que sua socialização enriquece a formação de um espírito crítico e inovador.

PROPOSTA DIDÁTICA PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

PROPOSTA DIDÁTICA NA PERSPECTIVA HISTÓRICO-CULTURAL

De acordo com Zabala (1998, p.18) sequência didática é “um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para a realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecido tanto pelos professores como pelos alunos”. Para esta Sequência Didática, utilizamos como referência a proposta de Marques (2022), na perspectiva Histórico-cultural de Vygotsky, que propõe as seguintes etapas: identificação dos conhecimentos prévios dos estudantes, sistematização do conhecimento científico, aplicação do conhecimento e identificação da evolução conceitual. As etapas sequenciais da proposta estão apresentadas de forma resumida no Quadro 11.

Quadro 11: Resumo das etapas sequenciais

Etapas da sequência didática	
1	Resgate dos conhecimentos espontâneos, a partir de situações vivenciadas pelos estudantes, relacionados com o objeto de estudo.
2	Discussão (apresentação de forma dialógica) dos conceitos em estudo, por meio da ação estruturante do professor, mediado por diferentes estratégias de ensino.
3	Inicialmente, a realização de atividades de aplicação dos conceitos em situações vivenciais e contextualizadas socialmente e a seguir apresentação de situações, quando possível, no contexto histórico e cultural global.
4	Realização de atividades de cooperação, compartilhamento e socialização.
5	Atividades de aplicação do conhecimento que permitam analisar a evolução conceitual dos estudantes.

Fonte: Adaptado de Marques (2022)

O autor propõe que em todas as etapas da sequência didática, temos que ter presente os seguintes princípios fundamentais: (a) todo o aprendizado é mediado pela fala (linguagem) e, nesse contexto, o foco interpretativo do fenômeno de ensinar e aprender é o conjunto das interações verbais; (b) todo aprendizado tem uma história prévia; (c) a aprendizagem de um conhecimento novo pressupõe a consideração da distância entre o nível de desenvolvimento real no qual o estudante é capaz de solucionar problemas de forma independente e o nível de desenvolvimento iminente, no qual o estudante necessita de orientação diretiva daquele que se propõe para ensinar; (d) a aprendizagem dos conceitos científicos deve se dar a partir dos conceitos espontâneos, ou seja, a partir do que o estudante já sabe. As escolhas do professor devem levar em consideração alguns princípios didáticos dentre os quais estão a valorização dos conhecimentos prévios dos estudantes; (e) as transformações produzidas nos processos de aprendizagem têm origem na cultura.

DESCRIÇÃO DOS ENCONTROS

A seguinte proposta de intervenção pedagógica consiste em uma sequência didática planejada para cinco (5) encontros de quatro (4) horas⁵⁴. O resumo das atividades está expresso no Quadro 12.

Propomos uma articulação entre a história da Óptica e as principais características da filosofia histórica de Bachelard, com ênfase nas rupturas e descontinuidades e nos perfis epistemológicos. Esta articulação entre a história da Óptica e a filosofia bachelardiana visa prover uma visão crítico-reflexiva da evolução do pensamento científico, visão esta que está ausente de abordagens que apresentam os resultados da ciência em ordem meramente cronológica (Melo; Peduzzi, 2007).

.....

54 - Reforçamos que esta proposta foi aplicada no contexto da formação de professores, com o texto servindo exclusivamente como material de apoio para o docente. Destacamos, ainda, que, devido às particularidades da carga horária disponível no Ensino Médio, a organização do tempo e dos conteúdos a serem abordados no curso pode exigir adaptações significativas.

Quadro 12: Organização das atividades da Sequência Didática

ENCONTRO	DESCRIÇÃO	OBJETIVOS
1	(i) A filosofia da ciência de Bachelard: obstáculos epistemológicos e perfil epistemológico; (ii) Discussão sobre o estudo e ensino da Óptica através de uma perspectiva histórica e epistemológica.	(i) Investigar as concepções conceituais e epistemológicas dos estudantes⁵⁵; (ii) Introduzir a epistemologia de Bachelard, a fim de fornecer ferramentas com as quais os estudantes possam analisar a evolução dos conceitos de óptica apresentados no decorrer do curso.
2	(i) Abordagem do Capítulo 2 do texto de apoio - A contribuição dos gregos: Óptica como uma teoria da visão. (ii) Atividade prática sobre ilusões de óptica e percepção da realidade.	(i) Investigar as concepções conceituais e epistemológicas dos estudantes; (ii) Discutir as primeiras tentativas dos Gregos para sistematizar um conhecimento sobre a luz e a visão.
3	(i) Abordagem do Capítulo 3 do texto de apoio - A Óptica medieval, a renascença e Kepler; (ii) Atividades práticas sobre a formação das imagens reais em lentes convergentes e espelhos côncavos.	(i) Investigar as concepções conceituais e epistemológicas dos estudantes; (ii) Analisar como o conhecimento grego foi absorvido criticamente pelos árabes e redescoberto pelos europeus, culminando na superação de diversos obstáculos, por Kepler, ao estabelecer a formação da imagem na retina; (iii) Investigar, por meio de atividade prática, concepções espontâneas relacionadas à formação de imagens e elementos da óptica geométrica.
4	(i) Abordagem do Capítulo 4 do texto de apoio - O domínio do mecanicismo; (ii) Atividades práticas sobre a formação das sombras coloridas.	(i) Investigar as concepções conceituais e epistemológicas dos estudantes; (ii) Examinar como o mecanicismo influenciou as teorias da luz de Descartes e Newton. E porque Newton escolheu tratar a luz como partícula e não onda; (iii) Investigar, por meio de atividade prática, as concepções dos estudantes sobre a relação da natureza da luz com a adição e subtração de cores, filtros e percepção visual das cores.

55 - Sugere-se fomentar produções escritas ou verbalizadas pelos estudantes ao longo de todo o curso, a fim de obter indícios sobre as suas concepções conceituais e epistemológicas. Como auxílio ao professor, fornecemos um Questionário e Guia para Entrevista comentado.

5	(i) Abordagem do Capítulo 5 do texto de apoio – Onda, partícula, onda-partícula; (ii) Atividade sobre situações de interação da radiação com a matéria.	(i) Investigar as concepções conceituais e epistemológicas dos estudantes; (ii) Analisar a superação dos modelos mecanicistas da luz através da introdução do conceito de fóton, inaugurando a era ultraracionalista do estudo da Óptica; (iii) Analisar algumas formas de interação de fótons com a matéria, a fim de compreender o fundamento quântico das cores das substâncias, da absorção, da difração e do efeito Compton.
---	---	--

I. PRIMEIRO ENCONTRO

No primeiro encontro, exponha a epistemologia de Bachelard, oferecendo uma compreensão sobre os conceitos de obstáculos epistemológicos e perfil epistemológico. Este conhecimento servirá como base para uma discussão mais aprofundada sobre a importância de abordar a Óptica por meio de uma perspectiva histórica e epistemológica.

Em todos os encontros, é salutar investigar as concepções espontâneas e científicas dos estudantes sobre os conceitos centrais da óptica. Como auxílio ao professor, fornecemos um Questionário e Guia para Entrevista comentado, os quais podem ser utilizados como fonte de questionamentos diversos sempre que o professor julgar conveniente.

II. SEGUNDO ENCONTRO

No segundo encontro em diante, dedique-se à identificação das concepções epistemológicas dos estudantes, visando conhecer aspectos do seu perfil epistemológico individual, e também o seu perfil conceitual, abarcando tanto conceitos espontâneos quanto científicos.

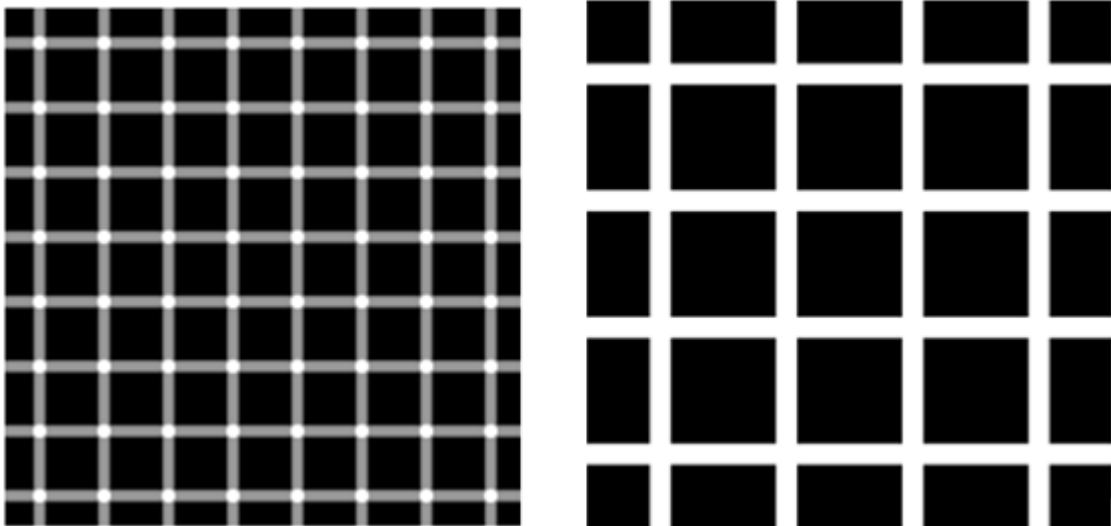
Realize a discussão do Capítulo 2, focado na contribuição dos gregos para a Óptica como uma teoria da visão. A fim de estimular uma reflexão mais aprofundada, realize uma atividade prática envolvendo a objetividade da percepção visual e a relevância dos aspectos psicológicos na interpretação das imagens. Sugere-se utilizar ilusões de óptica, como as faixas de Mach (inibição lateral) apresentadas nas Figuras Figura 13 e Figura 14.

Figura 13: Bandas de Mach, geradas pela imagem com gradiente de tons de cinza. As listras apontadas pelas setas são ilusões de óptica



Fonte: <https://cref.if.ufrgs.br/>

Figura 14: Ilusão da grelha, gerada pelo processo de inibição lateral, surge nas intersecções de linhas verticais e horizontais



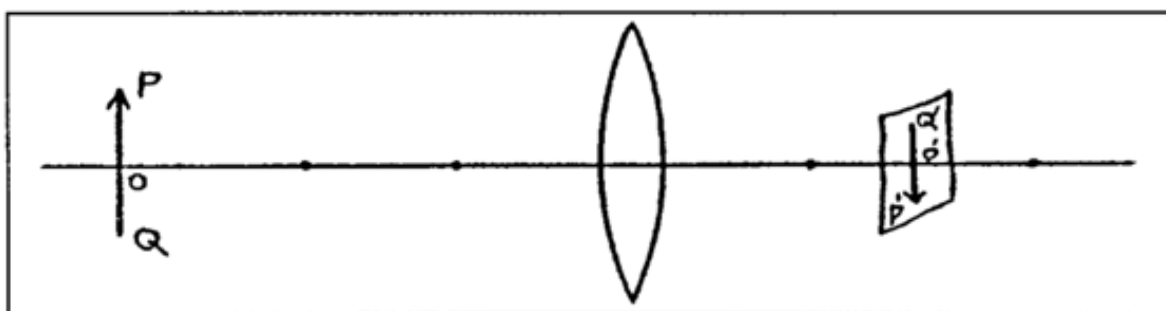
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ilus%C3%A3o_da_grelha

III. Terceiro encontro

No terceiro encontro, discuta o Capítulo 3, que aborda a evolução da Óptica ao longo da Idade Média, Renascença e finalizando com a contribuição de Kepler. Explore os avanços teóricos e experimentais nesse período, destacando como o uso de experimentos foi fundamental para superar vários aspectos do pensamento grego, influenciando o entendimento contemporâneo da Óptica.

Além disso, ofereça uma atividade prática aos estudantes, em uma oportunidade de aplicar seus conhecimentos sobre lentes, espelhos e anteparos em um contexto real de formação de imagens. A adaptação das propostas de Goldberg (1987) e Kumar (1999) permitirá que os alunos testem suas habilidades em prever a formação de imagens reais e virtuais em lentes convergentes e espelhos côncavos. Através do exemplo prático apresentado na Figura 15, em que o objeto PQ e sua imagem P'Q' são projetados em um anteparo, os estudantes serão desafiados a raciocinar sobre as possíveis mudanças na imagem se parte da lente fosse coberta e se a tela de projeção fosse removida, estimulando a reflexão crítica e a aplicação prática dos conceitos ópticos.

Figura 15: Exemplo de formação de imagem por uma lente convergente



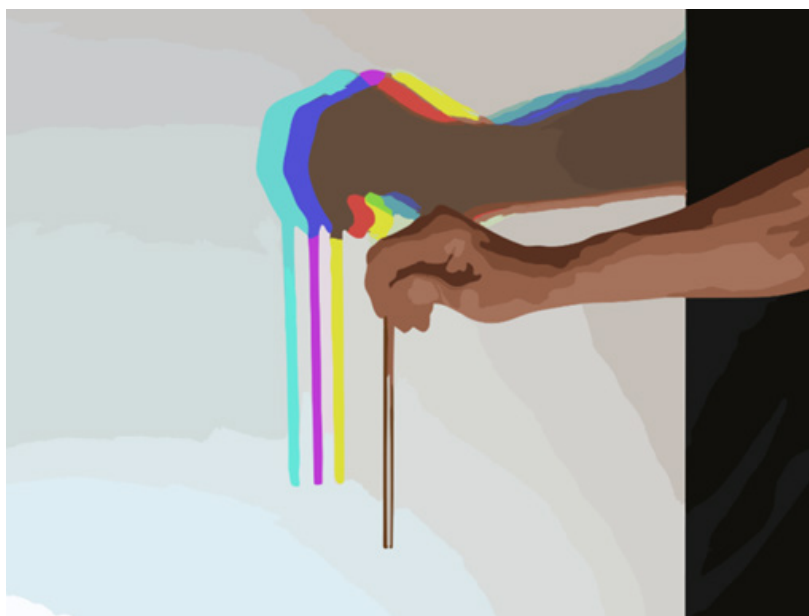
Fonte: Kumar, 1999, p.56

IV. QUARTO ENCONTRO

No quarto encontro, discuta o Capítulo 4, explorando a Óptica nos séculos XVII e XVIII, com especial atenção a Descartes e ao contexto de Isaac Newton e suas contribuições para a compreensão da natureza da luz e suas propriedades.

A atividade prática sugerida tem como objetivo investigar as sombras coloridas e seu processo de formação. Essa abordagem permitirá questionar os estudantes sobre a natureza da luz, sua relação com a composição de cores, formato de sombras e a percepção das cores pelo olho humano. Ao observar a formação de cores e sombras, os conceitos de propagação retilínea da luz serão explorados, demonstrando como isso influencia a posição das diferentes cores observadas. A atividade também abordará como o tamanho e a posição do obstáculo influenciam o tamanho da sombra e como novas cores surgem a partir da soma de diferentes cores. Utilizando a situação ilustrada na Figura 16, inicie a dinâmica com os estudantes de costas para a fonte luminosa, observando o anteparo, seguida por questionamentos sobre o número de fontes de luz presentes e suas respectivas cores, incentivando a reflexão crítica e a aplicação prática dos conceitos ópticos discutidos até então.

Figura 16: Sombras coloridas obtidas a partir de três fontes luminosas, vermelho, verde e azul. Observa-se que as sombras apresentam as cores ciano, magenta e amarelo



Fonte: Adaptado de <https://www.exploratorium.edu/snacks/colored-shadows>

V. QUINTO ENCONTRO

No quinto encontro, discuta o Capítulo 5, abordando o surgimento da mecânica quântica e sua descrição da luz.

A sugestão de atividade prática baseia-se no texto “Cavalgando um Fóton”, de Weiss (1996, p. 131), que oferece nove situações distintas de interação entre radiação e matéria. Nesse exercício, três fótons com diferentes energias (radiofrequência, visível e raio-X) encontram-se com três materiais distintos (metal, cerâmica e polímero), cada um com composições e arranjos estruturais variados. Essa atividade permitirá explorar aspectos de onda e partícula da luz visível e da radiação eletromagnética em geral, oferecendo aos estudantes a oportunidade de compreender como diferentes tipos de radiação interagem com materiais diversos. Essa experiência não só reforça os conceitos teóricos discutidos no capítulo, mas também estimula uma compreensão mais ampla das propriedades da luz e sua interação com a matéria em contextos do mundo real.

QUESTIONÁRIO

1) O que é luz?

1b) Como você explicaria o que é a luz para uma criança que terá o primeiro contato formal com esse assunto?

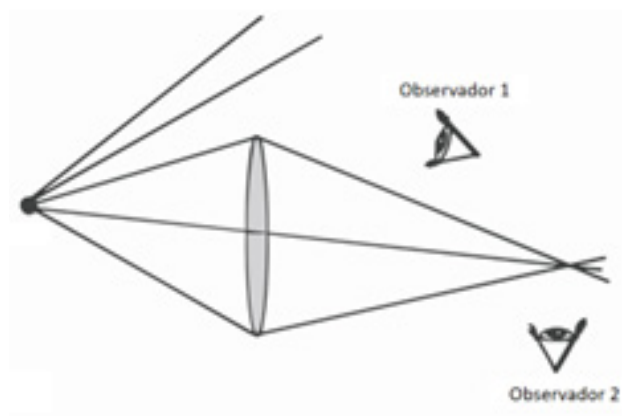
2) Como vemos os objetos? Faça um diagrama para auxiliar na sua explicação.

2b) Comente a seguinte afirmação: Vemos os objetos que possuem luz própria, pois a luz que eles emitem chega a nossos olhos. Para objetos não luminosos, o olho tem um papel ativo: a luz sai do olho para ver os objetos.

3a) Podemos ver a luz? Realmente enxergamos os raios ou feixes de luz que desenhamos nos diagramas de óptica geométrica?

3b) É comum durante o ensino de óptica geométrica, o professor afirmar que existem muitos outros raios, mas eles não serão desenhados. Decidir quais raios que poderiam de fato ser adicionados pode ser um desafio para o estudante. Analisando a figura a seguir, como você avalia a seguinte afirmação?

O Observador 1 verá o objeto e o Observador 2 verá a imagem, pois eles podem ver os raios do objeto e da imagem, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Ronen, 1993

4a) Comente a afirmação: Quando se observa o olho de outra pessoa, é possível ver uma pequena imagem daquilo que ela está observando. Isto se dá, pois a imagem sai pronta do objeto, conservando seus contornos e cores e viaja até o olho do observador.

4b) Comente a afirmação:

Vemos, pois finas camadas de átomos viajam do objeto até nossos olhos. Estas camadas têm o mesmo formato que o corpo que o emitiu, mas em tamanho menor, a fim de poder entrar no olho. Por sua vez, a iluminação natural (Sol) ou artificial tem a função de tornar o meio transparente para que estes contornos e cores dos objetos possam chegar aos nossos olhos. Portanto, a luz é apenas um fator secundário que contribui para a visão, facilitando ou permitindo o processo através do qual uma imagem do objeto é transferida para o olho.

5) Comente a afirmação:

A luz é uma perturbação transmitida através de um meio material, mesmo que esse meio seja imperceptível para nós. Considerando que este meio seja preenchido por imperceptíveis esferas, esta perturbação é a pressão transmitida, esfera a esfera, até alcançar nossos olhos. Por exemplo, a pressão exercida pelas estrelas, como o Sol, sobre as esferas possui um movimento de expansões e contrações, como batidas do coração, a prova disso são as cintilações das estrelas e a emissão de luz em todas as direções.

6) A seguir, são apresentadas duas ideias. A primeira, defende a luz como partícula e a segunda apresenta argumentos para desqualificar esta ideia. Discuta se alguma delas ou as duas fazem sentido para você e como você argumentaria para defender o seu ponto de vista em relação a cada uma delas.

(i) A luz é um conjunto de partículas. Isso se conclui, pois ela sofre reflexão, refração, composição,

divisão e movimento no tempo, mas especialmente por se propagar em linhas retas e ser parada por um obstáculo.

(ii) É muito mais fácil entender como um tremor pode se propagar de um extremo a outro, do que conceber como uma partícula de luz pode continuar seu movimento e direção inalterados, através de um espaço tão vasto e com uma velocidade tão grande; enquanto inúmeras outras partículas estão por toda parte se movendo em direções diferentes e muitas vezes contrárias.

GUIA PARA ENTREVISTA COMENTADO

A seguir, apresentamos um quadro com tópicos de óptica que podem ser utilizados em entrevistas com os estudantes. Além disso, as ideias nele apresentadas podem ser adaptadas para aplicação em questionários, intervenções ao longo dos encontros ou como orientações para que o professor aborde determinados temas sob diferentes perspectivas epistemológicas.

Nº	TÓPICOS	CATEGORIAS DE RESPOSTAS ESPERADAS ⁵⁶ (Animista/ Realista/ Racionalista/ UL- TRARRACIONALISTA)	CRITÉRIOS PARA SE ENQUADRAR NAS CATEGORIAS ESPERADAS ⁵⁷
1	A luz se vê?	Animista/ Racionalista	A ideia de que a luz pode ser vista independentemente de sua incidência nos olhos pode refletir uma visão animista, onde aspectos vitais ou intencionais são atribuídos à natureza./ A necessidade de que a luz entre nos olhos, por incidência direta a partir da fonte ou de forma indireto, espalhada por poeira ou gotículas de água, segue uma lógica racionalista.

56 - No contexto da epistemologia de Bachelard, as "Categorias de respostas esperadas" são associadas às escolas filosóficas. De acordo com as definições apresentadas no Apêndice A, estabelecem-se as seguintes relações: a noção Animista pertence ao Realismo Ingênuo; a noção Realista refere-se ao Empirismo Claro e Positivista; a noção Racionalista abrange o Racionalismo Clássico e o Racionalismo Completo; e a noção Ultrarracionalista é equivalente ao Racionalismo Discursivo.

57 - Estes critérios não pretendem prever todas as respostas possíveis para as questões propostas, mas tem o objetivo de preparar o entrevistador para uma melhor condução das entrevistas semiestruturadas.

2	Raios de luz em meio homogêneo	Racionalista/ Ultrarracionalista	A concepção de raios de luz paralelos em um meio homogêneo e possíveis alterações na trajetória, devido ao meio, segue uma lógica racionalista, baseada na óptica geométrica./ A interpretação de raios de luz como fótons submetidos a fenômenos como tunelamento, absorção e reemissão adotam uma postura ultrarracionalista.
3	Luz solar e luz artificial	Realista/ Racionalista/ Ultrarracionalista	A diferenciação entre luz solar e artificial pode ser vista como um obstáculo substancialista, onde se atribuem qualidades distintas e essenciais a diferentes tipos de luz, como luz fria ou quente, que tem o poder de crescer plantas ou não./ O racionalista vê a diferença como composições espectrais e intensidades diferentes./ Uma visão ultrarracionalista pode discutir a diferença entre as origens da luz solar e artificial.
4	Obstáculos e características das sombras produzidas	Realista/ Racionalista/ Ultrarracionalista	A relação direta entre obstáculo e formato da sombra pode indicar uma visão realista./ A distinção entre a origem de sombra e penumbra, baseia-se em princípios da óptica geométrica, indica uma lógica racionalista./ Uma abordagem ultrarracionalista consideraria fenômenos como a difração da luz e sua influência nos padrões de sombras próximos às bordas.
5	Imagem por orifício	Racionalista	A formação da imagem através de um orifício pode ser explicada satisfatoriamente por princípios da óptica geométrica, enquadrando-se na escola racionalista.
6	Necessidade de luz para visão	Realista/Racionalista	O realista poderá dizer que, “se está escuro, não vejo, logo, preciso da luz para ver”./ O racionalista pode ir além e discutir a necessidade de a luz alcançar os olhos, a influência do meio (neblina, água, fumaça) em dispersar a luz e a função vital do olho e do cérebro no processo da visão.
7	Relação refração e reflexão	Realista/ Racionalista/ Ultrarracionalista	A análise da refração e reflexão como fenômenos distintos, mas possivelmente coexistentes, é típica do realismo./ A compreensão de que são fenômenos indissociáveis definidos pelas condições de contorno na superfície de separação dos meios segue uma lógica racionalista/ Aspectos quânticos ao identificar a luz como fótons e submeter a análise de refração e reflexão como fenômenos estatísticos, segue uma lógica ultrarracionalista.

8	Reflexão em espelhos	Realista/ Racionalista/ Ultrarracionalista	O realista pode responder que a imagem refletida é idêntica à real, logo reflete 100% da luz. Ou ainda, medir as intensidades incididas e refletidas e, de posse destes números, se dar por satisfeito./ O racionalista investigará os motivos dos valores medidos pelo realista, mas sem abordar o caráter quântico do fenômeno. / Quando abordadas as limitações impostas pela quântica, como o princípio da incerteza de Heisenberg, ingressa-se no ultrarracionalismo.
9	Posição da imagem em espelho plano	Realista/ Racionalista	A conclusão de que a imagem em um espelho plano está na superfície do espelho, ou atrás dele, é de caráter realista./ A abordagem racionalista possibilita compreender que esta é uma imagem virtual formada no cérebro pela extrapolação dos raios refletidos.
10	Tamanho da imagem em espelho plano	Realista/ Racionalista	Uma resposta que leve em consideração a posição do observador ou do objeto, fazendo crer que a percepção de profundidade e ângulo de visão são, de fato, devido a mudanças no tamanho da imagem, provém de um realismo ingênuo./ A relação entre o tamanho da imagem e a distância do objeto ou observador ao espelho plano é uma questão de óptica geométrica, enquadrada na escola racionalista.
11	Lente coberta e imagem	Realista/Racionalista	Uma resposta que relacione diretamente a cobertura da lente com a causa de uma formação parcial da imagem, segue uma lógica realista./ Uma resposta fundamentada a partir da óptica geométrica, que leve em conta outros raios luminosos, além dos "raios notáveis", adequa-se ao racionalismo.

As seguintes perguntas foram utilizadas para montar o quadro:

1. Como você acredita que seria a experiência de observar a luz em uma situação em que existisse apenas você, a luz e o vácuo? Você considera que a visibilidade da luz depende de fatores como o meio em que se propaga ou a interação com os olhos do observador ou objetos materiais?

Contexto para a questão: A luz, por si só, é vista se ela entrar nos nossos olhos. Numa situação em que a luz estivesse direcionada para outro lugar, ela não seria percebida, mesmo que passasse muito perto dos olhos do observador. O que pode causar a

sensação de que a luz é vista, independentemente da sua direção de propagação, é a sua interação com partículas de poeira ou gotículas de água que a espalham em muitas direções, eventualmente atingindo os olhos e tornando o feixe visível. No vácuo, a ausência destes espalhamentos tornaria a luz invisível, a não ser que o feixe estivesse direcionado aos nossos olhos.

2. Em um meio homogêneo, como o ar em condições normais ou o vácuo no espaço, como você descreveria o comportamento dos raios de luz? Quais fatores, em sua opinião, podem influenciar a trajetória dos raios de luz nesse tipo de meio?

Contexto para a questão: A forma mais habitual de compreender um meio homogêneo é considerar um meio com índice de refração constante. Neste caso, a luz deve viajar em linha reta. Entretanto, variações, por vezes imperceptíveis, no índice de refração do ar ou água, devido à gradientes de densidade, são muito comuns e podem alterar a trajetória da luz. Outros fatores que podem influenciar a trajetória da luz, como variações de temperatura, variações gravitacionais em grande escala ou efeitos de difração

3. Como você descreveria as características da luz solar comparadas às da luz artificial? Você percebe diferenças significativas entre elas em termos de natureza e efeito?

Contexto para a questão: Pode-se citar diferenças em termos da origem da luz incandescente, fluorescente, led, e solar. Também há diferenças nos seus espectros, em termos de faixa espectral e também nas faixas de absorção, evidenciando os materiais que compõe estas fontes.

4. Como a variação nos tamanhos e formas de diferentes obstáculos afeta as características das sombras produzidas, especialmente em relação à nitidez e aos padrões observados nas bordas das sombras?

Contexto para a questão: Este fenômeno pode ser explicado através dos princípios básicos da óptica geométrica e da difração da luz.

5. Como você acredita que o tamanho e a forma do orifício influenciam no tamanho da imagem de um objeto projetada através dele? Existem outros fatores que você considera relevantes nesse processo?

Contexto para a questão: Esta questão foi explicada por Kepler, o tamanho do orifício influencia a nitidez da imagem, quanto menor o furo, mais nítida a imagem. Entretanto, ao reduzir o furo também se reduz o brilho da imagem. O formato do furo não deve influenciar nas características da imagem formada. Estas conclusões são obtidas a partir da óptica geométrica, sendo válida para furos grandes se comparados à ordem de grandeza do comprimento de onda da luz.

6. Como você entende o processo de percepção visual de um objeto? Na sua opinião, é necessário que a luz proveniente do objeto alcance nossos olhos para que possamos vê-lo? Existem outros aspectos ou condições que você considera importantes nesse processo?

7. Na sua opinião, os fenômenos de refração e reflexão da luz são mutuamente exclusivos, ou seja, a ocorrência de um exclui a possibilidade do outro, ou você acredita que eles podem coexistir sob certas condições?

8. Como você avalia a capacidade de um espelho de refletir a luz que incide sobre ele? Quais fatores você considera que influenciam essa capacidade e até que ponto acredita que um espelho pode efetivamente refletir a luz?

Contexto para a questão: O limite é dado por efeitos quânticos (princípio da incerteza de Heisenberg) e corroborado pelos processos de fabricação que, por mais eficientes, não geram superfícies perfeitas em termos de topologia e pureza.

9. Quando você observa uma imagem por meio de um espelho plano, onde você acredita que aquela imagem está localizada? Ela estaria na superfície do espelho, atrás dele, ou apenas existe devido à nossa percepção?

Contexto para a questão: A imagem formada no espelho plano é sempre virtual e, por isso, a sua construção é consequência da forma como o cérebro interpreta os raios de luz refletidos. Ou seja, ela não pode ser projetada em um anteparo.

10. Como você descreveria os fatores que influenciam o tamanho da imagem refletida por um espelho plano? Em sua opinião, qual é o papel da distância entre o objeto e o espelho nesta relação? Há outros elementos ou condições que você considera importantes na determinação do tamanho da imagem refletida?

Contexto para a questão: O tamanho da imagem em um espelho plano é sempre do mesmo tamanho do objeto. A distância entre o objeto e o espelho influencia na sensação de profundidade da imagem, que pode ser interpretada como uma mudança no seu tamanho. Outro aspecto que pode influenciar na percepção do tamanho da imagem é a posição do observador, que estabelece um ângulo de observação, o qual pode induzir a perceber (erroneamente) diferentes tamanhos de imagem.

11. Como você acha que a cobertura parcial de uma lente afeta a formação da imagem de um objeto real? Existem outros aspectos que você considera importantes na influência sobre a formação da imagem neste caso?

Contexto para a questão: A cobertura parcial da lente pode tornar a imagem menos brilhante, mas não altera outras características, como posição e tamanho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS & APÊNDICES

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexander, Hartley B. Plato's Conception of the Cosmos. **The Monist**, v. 28, n. 1, p. 1-24, jan. 1918. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/27900668>.

Aristotle. **On the Soul, Parva Naturalia, On Breath**. Tradução por W. S. Hett. Londres: William Heinemann Ltd; Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1935.

Beller, Mara. The Birth of Bohr's Complementarity: The Context and the Dialogues. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 23, n. 1, p. 147-180, 1992.

Buss, C. da S. O conceito de texto de apoio aos professores enquanto produto educacional dos mestrados profissionais. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, Passo Fundo, v. 5, n. 2, p. 999-1017, 2022.

Caruso, Francisco; Oguri, Vitor. **Física Moderna - Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2006.

Chimisso, Cristina. **Writing the history of the mind: Philosophy and science in France, 1900 to 1960s**. 1ª ed. Abingdon, Oxon: Routledge, 2016. (Science, technology and culture, 1700–1945). ISBN 978-0-7546-5705-7.

Bachelard, G., **A Filosofia do não**. 2 ed – São Paulo: Abril Cultural, 1978. (Coleção Os Pensadores).

Bachelard, G., **A formação do espírito científico**. Contraponto Editora Ltda. Rio de Janeiro, 2005.

Buchwald, Jed Z. **The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves**. Chicago: The University of Chicago Press, 1994. ISBN 0-226-07887-6.

Brush, Stephen G. How ideas became knowledge: The light-quantum hypothesis 1905–1935. **Historical Studies in the Physical and Biological Sciences**, v. 37, n. 2, p. 205-246, mar. 2007.

Caspar, Max. **Kepler**. Tradução e edição por C. Doris Hellman. Nova York: Dover Publications, 1993. Originalmente publicado em 1959 por Abelard-Schuman Limited, Londres. eISBN-13: 978-0-486-15175-5.

Cohen, Jerome Bernard. Preface. In: Newton, Isaac. **Opticks**. Illustrated ed. Series: Dover Books on Physics. Mineola, NY: Dover Publications, 2012. 544 p. ISBN 978-0486602059.

Cornford, Francis MacDonald. **Plato's Cosmology: The Timaeus of Plato**. Indianapolis/Cambridge: Hackett Publishing Company, 1997 (primeira publicação 1935 por Routledge). ISBN 0-87220-386-7.

Couto, Luís Flávio Silva. Karl Popper e a falseabilidade como critério básico de cientificidade de uma teoria. In: Couto, Luís Flávio Silva (org.). **Pesquisa em psicanálise**. (Coletâneas da Anpepp, no. 16, p. 129-140). Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Psicologia, 1996.

Darrigol, Olivier. **A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century**. Oxford: Oxford University Press, 2012. ISBN 978-0-19-964437-7.

Descartes, René. **Descartes: The World and Other Writings**. Editado por Stephen Gaukroger. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. ISBN 978-0521631587.

Descartes, René. **Discurso sobre o Método, Óptica, Geometria e Meteorologia**. Tradução de Paul J. Olscamp. 1. ed. Indianapolis: The Bobbs-Merrill Company, Inc., 1965. Edição original de 1637.

Duarte, W. **Os conteúdos escolares e a ressurreição dos mortos**. 2 ed., Campinas: Autores Associados, 2021.

Dupré, Sven. Inside the "Camera Obscura": Kepler's Experiment and Theory of Optical Imagery. **Early Science and Medicine**, v. 13, n. 3, p. 219-244, 2008. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/20617729>.

Einstein, A. On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light. **Annalen der Physik**, v. 17, p. 132-148, 1905. In: Einstein, Albert. **The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909**. Tradução de Anna Beck. Consultoria de Peter Havas. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1989. ISBN 0-691-08549-8.

Einstein, Albert. Carta para M. Besso, 29 jul. 1918. In: **The Collected Papers of Albert Einstein**, vol. 8, doc. 59.

Einstein, Albert. Foreword. In: Newton, Isaac. **Opticks**. Illustrated ed. Series: Dover Books on Physics. Mineola, NY: Dover Publications, 2012. 544 p. ISBN 978-0486602059.

Euclides. Óptica. Traduzido por Guilherme Rodrigues Neto. **Scientiæ Studia**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 893-936, 2013.

Ferrer, A. F. P. Algumas contribuições da epistemologia de Gaston Bachelard à pesquisa em ensino de ciências. **Anais VI ENPEC**, 2007. Disponível em: <http://fep.if.usp.br/~profis/arquivos/vienpec/CR2/p29.pdf>.

Guicciardini, Niccolò; Mandelbrot; Scott. About. In: NEWTON, Isaac. **Trinity College Notebook**. [s.d.]. Disponível em: <https://cudl.lib.cam.ac.uk/view/MS-ADD-03996/38>.

Hobza, Pavel. Anaximenes' ἀήρ as generating mist and generated air. **Apeiron**, v. 53, n. 2, pp. 97-122, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/apeiron-2018-0058>.

Homer. **The Iliad**, traduzido por Samuel Butler. Capítulo 14. Project Gutenberg, 2021. Disponível online em: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/2199/pg2199-images.html#chap14>.

Hunt, Bruce J. **The Maxwellians**. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1994. 280 p. ISBN 978-0801482342.

Jordan, Robin. G. **Maybe light isn't a wave! Wave-particle dilemma**. [s.d.]. Disponível em: https://cosweb1.fau.edu/~jordanrg/Honors/chapter_14.pdf.

Korczak, Andrzej. Why the water? The vision of the world by Thales of Miletus. **Necmettin Erbakan Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi**, v. 35, p. 43-52, 2013.

Lindberg, David C. **Theories of Vision from al-Kindi to Kepler**. Chicago: The University of Chicago Press, 1976. (University of Chicago history of science and medicine). ISBN 0-226-48234-0.

Long, Anthony Arthur. **The scope of early Greek philosophy**. In: The Cambridge Companion to Early Greek Philosophy. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN-10: 0521446678.

Marques, N. L. R. **Sequência didática na perspectiva Histórico-Cultural**. Material produzido para a disciplina de Teoria Histórico-cultural do Mestrado Profissional em Ciências e Tecnologias na Educação (PPGCITED – IFSul/CAVG) em 2022. Disponível em: <https://nelsonreyes.com.br/Sequ%C3%Aancia%20did%C3%A1tica%20na%20perspectiva%20Hist%C3%B3rico-Cultural.pdf>

Maxwell, James Clerk; Niven, William Davidson. (Ed.). **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, Vol. I**. Cambridge: Cambridge University Press, 1890.

Melo, A. C. S. de; PEDUZZI, L. O. Q. Contribuições da epistemologia bachelardiana no estudo da história da óptica. **Ciência & Educação**, v. 13, n. 1, p. 99-126, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132007000100007>

Michelson, Albert Abraham; Morley, Edward Williams. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. **American Journal of Science**, [s.l.], v. 34, n. 203, p. 333-345, 1887.

Mortimer, E. F. **Linguagem e formação de conceitos no ensino de ciências**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2000. 383p.

Newman, William R. Newton's Early Optical Theory and its Debt to Chymistry. In: Jacquart, Danielle; Hochmann, Michel (eds.). **Lumière et vision dans les sciences et dans les arts, de l'Antiquité au XVIIe siècle**. Genève: Librairie Droz, 2010.

Newton, Isaac. New Theory about Light and Colors, 1672. In: Cohen, Jerome. Bernard; Schofield, Robert Edward (eds.). **Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and related documents**. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts; London, England: Harvard University Press, 1978.

Newton, Isaac. **Opticks**. Illustrated ed. Series: Dover Books on Physics. Mineola, NY: Dover Publications, 2012. 544 p. ISBN 978-0486602059.

Nolan, Lawrence. **The Cambridge Descartes Lexicon**. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. ISBN 978-0-521-19352-8.

Oliva, Luís César. O conatus em Descartes, Hobbes e Espinosa. **doispontos**, Curitiba, São Carlos, v. 15, n. 1, p. 61-77, abr. 2018.

Oxford University Press. **Oxford Languages and Google – Dicionários**. Consulta realizada via Google.

Pais, Abraham. Einstein and the quantum theory. **Reviews of Modern Physics**, v. 51, n. 4, out. 1979.

Panofsky, Erwin. **A Perspectiva como Forma Simbólica**. Tradução de Elisabete Nunes; revisão de Carlos Morujão. Lisboa: Edições 70, 1993. ISBN 972-44-0886-8.

Pazim, Rafael Cardim. **A história da Óptica sob a perspectiva epistemológica de Bachelard: estudo de caso sobre os perfis epistemológicos de estudantes de um curso de Licenciatura em Física**. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2025.

Rodrigues Neto, Guilherme. Euclides e a geometria do raio visual. **Scientiæ Studia**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 873-892, 2013.

Rosenthal, Franz. The Classical Heritage in Islam. Berkeley: University of California Press, 1975. 298 p.

Roychoudhuri, Chandrasekhar; Kracklauer, A. F.; Creath, Katherine. **The Nature of Light: What Is a Photon?** 1ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. 452 p. ISBN 978-0367387105.

Rizo-Patron, Eileen; Casey, Edward S.; Wirth, Jason M. (Eds.). **Adventures in phenomenology: Gaston Bachelard**. Albany, NY: State University of New York Press, 2017. (SUNY series in contemporary French thought). ISBN 978-1-4384-6605-7.

Sabra, Abdelhamid Ibrahim. **Theories of Light: From Descartes to Newton**. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1981.

Sedley, David Neil. **The Cambridge companion to Greek and Roman philosophy**. Cambridge University Press, 2003.

Sengupta, Dipak L.; Sarkar, Tapan K. Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the Early History of Electromagnetic Waves. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 45, n. 2, p. 13-19, 2003.

Shapiro, Alan. E. Kinematic Optics: A Study of the Wave Theory of Light in the Seventeenth Century. **Archive for History of Exact Sciences**, 11(2/3), 134–266. 1973. <http://www.jstor.org/stable/41133375>.

Slowik, Edward. **"Descartes' Physics"**. In: The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Edição de inverno 2023. Editado por Edward N. Zalta & Uri Nodelman. Disponível em: <https://plato.stanford.edu/archives/win2023/entries/descartes-physics/>. Acesso em: 19/02/2024.

Smith, A. Mark. Ptolemy's Theory of Visual Perception: An English Translation of the "Optics" with Introduction and Commentary. **Transactions of the American Philosophical Society**, New Series, v. 86, n. 2, pp. iii-v+vii-xi+1-61+63-261+263-269+279-300, 1996. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/3231951>.

Smith, A. Mark. **From Sight to Light: The Passage from Ancient to Modern Optics**. Chicago & London: The University of Chicago Press, 2015. ISBN 978-0-226-17476-1. DOI: 10.7208/chicago/9780226174938.001.0001.

Smith, A. Mark. Greek Optics. In: Jones, Alexander; Taub, Liba (Eds.). **The Cambridge History of Science, Volume 1: Ancient Science**. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. Parte III - Greek and Greco-Roman. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9780511980145>.

Squire, Michael (Ed.). **Sight and the Ancient Senses**. Milton Park, Abingdon, Oxon: Routledge, 2016. (The Senses in Antiquity). ISBN 978-1-84465-865-7.

Straker, Stephen. Kepler, Tycho, and the 'Optical Part of Astronomy': the Genesis of Kepler's Theory of Pinhole Images. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 24, n. 4, p. 267-293, 1981. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/41133623>.

Taub, Liba Chaia. **Ptolemy's Universe: The Natural Philosophical and Ethical Foundations of Ptolemy's Astronomy**. Chicago and LaSalle, Illinois: Open Court, 1993. ISBN 0-8126-9228-4

Theodossiou, E.; Mantarakis, P.; Dimitrijevic, M. S.; Manimanis, V. N.; Danezis, E. From the infinity (apeiron) of anaximander in ancient greece to the theory of infinite universes in modern cosmology. **Astronomical and Astrophysical Transactions** (AApTr), v. 27, n. 1, pp. 162-176, 2011. ISSN 1055-6796.

Tossato, Claudemir Roque. Os fundamentos da óptica geométrica de Johannes Kepler. **Scientiæ Studia**, São Paulo, v. 5, n. 4, p. 471-499, 2007.

Turbayne, Colin Murray. **El mito de la metáfora**. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 1974. ISBN 968-16-1053-9, 978-968-16-1053-1. 288 p.

Trusted, Jennifer. **Physics and Metaphysics: Theories of Space and Time**. 1st ed. Abingdon, Oxon: Routledge; New York, NY: Routledge, Taylor & Francis, 1991. ISBN 0-415-05948-8.

Van Riel, Gerd. Matter Doesn't Matter: On the Status of Bodies in the Timaeus (30a–32b and 53c–61c). In: Jorgenson, Chad; Karfík, Filip; Špinka, Štěpán (Eds.). **Plato's Timaeus: Proceedings of the Tenth Symposium Platonicum Pragense**. Brill's Plato Studies Series, vol. 5. Leiden: Brill, 2020. p. 169-186. Disponível em: https://doi.org/10.1163/9789004437081_010.

Watson, Bruce. **Light: A Radiant History from Creation to the Quantum Age**. New York: Bloomsbury, 2016. ISBN 978-1620405598.

Webster, Colin. Ptolemy's Optics, double-vision, and the technological afterimage. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 94, p. 191-200, 2022.

Westfall, Richard S. **Never at Rest: A Biography of Isaac Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

Whittaker, Edmund Taylor. Introduction. In: Newton, Isaac. **Opticks**. Illustrated ed. Series: Dover Books on Physics. Mineola, NY: Dover Publications, 2012. 544 p. ISBN 978-0486602059.

Williams, L. Pearce. Foreword. In: Hunt, Bruce J. **The Maxwellians**. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1994. 280 p. ISBN 978-0801482342.

Zabala, A. **A prática educativa: como ensinar**. Porto Alegre: Artmed, 1998.

APÊNDICE A - CATEGORIZAÇÃO EPISTEMOLÓGICA DO CONCEITO DE LUZ

Bachelard (1978) defende que o progresso do conhecimento científico ocorre no sentido de um racionalismo crescente, passando por estágios intermediários bem estabelecidos. Além disso, os conceitos de uma determinada área do conhecimento científico podem ser categorizados dentro desses estágios de desenvolvimento. Esses estágios de evolução do conhecimento são denominados escolas filosóficas. Para abarcar a evolução do conceito de luz ao longo da história da Óptica, adotamos as seguintes escolas: realismo ingênuo, empirismo claro e positivista, racionalismo clássico, racionalismo completo e racionalismo discursivo.

A primeira escola, denominada realismo ingênuo, expressa a definição mais simples e grosseira do conceito, não há provas subsidiando as conclusões. Ela é inata, não é necessário que seja ensinada. Neste sentido, o realismo ingênuo também pode ser relacionado com as concepções advindas da experiência primeira, aceitas sem questionamento. Relaciona-se com o surgimento espontâneo do conceito de fogo visual na sociedade grega, influenciando suas teorias da visão. Essa teoria propunha que o olho emitia um raio de luz que inspecionava o objeto a ser visualizado, estabelecendo um papel secundário para a luz no processo da visão. Rejeitando a ação à distância, essa abordagem sugeria a necessidade de algum tipo de contato entre o olho do observador e o objeto. A popularidade dessa crença era tão ampla que aparece em poesias e peças de teatro, mesmo antes do surgimento da filosofia. Alcmeão de Crotona afirmava que a existência do fogo ocular era comprovada pelo fato de que um golpe no olho provoca sensações visuais, como faíscas. A comparação do fogo visual com chamas ou com o fogo proveniente do sol também era comum.

Na segunda escola, o empirismo claro e positivista, existe a observação dos fenômenos com o objetivo de descrevê-los diretamente, sem avançar para especulações teóricas profundas. Essa abordagem valoriza a acumulação de descrições empíricas e a variação no número de observações para garantir a objetividade dos dados. É marcada pelas ideias dos atomistas e dos estoicos¹. Nelas, ocorre uma evolução do conceito de

1 - Pode-se considerar que as teorias dos atomistas e dos estoicos se aproximam dessa escola, especial-

fogo visual, seja por sua negação ou por sua sofisticação. A negação veio do atomismo, cuja teoria da visão baseia-se na ideia de que o objeto emite uma fina camada de átomos (um simulacro) que precisa entrar em contato com o olho para que a visão ocorra. Já os estoicos propuseram que o pneuma óptico, um meio senciente, se estenderia do centro de consciência do cérebro até o olho e, na presença de iluminação externa, até o objeto observado, conectando o olho ao objeto. Sob essa perspectiva, o astrônomo grego Hiparco descreveu o olho como uma “mão visual” (Squire, 2016, p. 17).

A terceira escola, denominada racionalismo clássico, caracteriza-se pela superação das escolas anteriores. Essa superação ocorreu com a primeira racionalização do processo da visão, realizada por Euclides, que aplicou a geometria euclidiana à óptica, resultando na geometrização do raio visual. Ptolomeu aprimorou os estudos de Euclides por meio de diversos recursos experimentais, aprofundando-se na investigação de fenômenos como refração e reflexão. No entanto, é importante destacar que os estudos sobre a natureza da luz e das cores não avançaram nesta fase.

Na quarta escola, o racionalismo completo, as noções elementares da escola anterior são multiplicadas através do desenvolvimento de técnicas matemáticas e a normalização da prática experimental, que passam a fundamentar as discussões sobre as teorias da luz. O extromissionismo é superado por Kepler. A metafísica deixa de ser aceita como pressuposto fundamental nas discussões científicas, a partir da abordagem cartesiana e consolidando-se com Newton, através de sua autodenominada filosofia experimental. Questões sobre a natureza da luz tornam-se mais relevantes, como a discussão sobre se ela é onda ou partícula.

A quinta escola, denominada racionalismo discursivo, é produto da racionalização teórico-instrumental em avançada maturidade, implica um rompimento com o pensamento expres-

mente no que diz respeito à tentativa de basear a visão em fenômenos observáveis, como a emanção material dos átomos ou a ação do pneuma óptico. Apesar de ambas as teorias terem uma lógica interna que objetivava explicar os fenômenos observados, as explicações ainda dependiam de uma observação empírica superficial e de ajustes ad hoc na medida em que novos fenômenos contraditórios surgiam. Portanto, a escolha por manter as teorias estoicas e atomistas dentro da escola filosófica do empirismo claro e positivista se justifica, pois persistia a superficialidade na compreensão dos fenômenos ópticos e a busca por diversos fenômenos para apoiar diferentes aspectos dessas teorias. Contudo, pode-se questionar essa categorização, pois os elementos especulativos presentes nas duas teorias sugerem uma tentativa de racionalização que transcende a simples descrição dos fenômenos observados.

so pelo cartesianismo e todos os outros sistemas anteriores, cujas metafísicas buscavam uma realidade substancial, imutável e irreduzível. Contém o conceito de luz como é compreendido atualmente: a luz como objeto quântico. Contudo, isso não significa que seja um conceito definitivo; ainda existem questões conceituais não resolvidas e que podem, conforme defende Bachelard (1978), inaugurar novas escolas filosóficas para acolher o novo conhecimento.

A seguir, no Quadro 14, apresentamos uma proposta de perfil epistemológico para o conceito de luz.

Quadro 14: Proposta de perfil epistemológico para o conceito de luz

ESCOLA FILOSÓFICA	DESCRIÇÃO	PERÍODO APROXIMADO ²
Realismo ingênuo	Conceito de fogo visual na sua gênese, em que parece surgir de forma espontânea na sociedade grega.	Aparição na <i>Iliada</i> , de Homero, escrita no século VIII a.C. Contudo, é provável que esta noção já existia antes.
Empirismo claro e positivista	A evolução do conceito de fogo visual, o surgimento das teorias do meio inerte e do meio “senciente”.	O século V a.C. marca o surgimento das teorias dos Atomistas. A influência do Estoicismo se deu até 200 d.C.
Racionalismo clássico	A geometrização do raio visual por Euclides e Ptolomeu, como o primeiro experimentador, são a primeira racionalização do processo da visão. Contudo, não se dedicaram em explicar a natureza da luz ou origem das cores.	III a.C. com Euclides e II d.C. com Ptolomeu.
Racionalismo completo	Luz como onda e luz como partícula. Inclui os desenvolvimentos provenientes do mecanicismo e das teorias ondulatórias, corroborados pelos avanços nos métodos matemáticos.	Kepler, século XVI, marca o início deste período. Huygens, século XVII e Newton, século XVIII são os exemplos máximos desta escola.
Racionalismo discursivo	Luz como objeto quântico.	Einstein, em 1905, com a hipótese do quantum de luz, até a atualidade.

Fonte: Autor

.....
² - As datas e os períodos são aproximados, não existe a intenção de demarcar rigidamente todas as transições entre as escolas filosóficas. Entendemos que diferentes perspectivas podem selecionar outras datas e eventos de ruptura.

APÊNDICE B - CATEGORIZAÇÃO ONTOLÓGICA DO CONCEITO DE LUZ

Mortimer (2000) propõe que os conceitos científicos podem ser categorizados de acordo com o que ele denominou “perfil conceitual”. O aspecto que estrutura o perfil conceitual é de natureza ontológica, ou seja, relacionado à essência ou à natureza do conceito.

Historicamente, o conceito de luz passou por mudanças profundas, inclusive em sua camada ontológica. No Quadro 10, apresentamos uma proposta de perfil conceitual para o conceito de luz. A análise desse perfil destaca como a evolução do conceito reflete as transformações na compreensão científica ao longo da história. Inicialmente, a luz foi concebida em relação ao olho humano, com teorias baseadas no “fogo visual” e na interação direta entre o olho e o objeto. Essas teorias, com o tempo, foram substituídas por interpretações mais elaboradas, como a ideia de um meio inerte ou ativo influenciando a luz.

Com o avanço da ciência, a luz passou a ser entendida de forma independente do olho humano, com o auxílio de modelos matemáticos e experimentais. Esse progresso culminou na formulação de teorias que descrevem a luz como onda, partícula e, por fim, como objeto quântico, refletindo uma evolução significativa no entendimento de sua natureza ontológica.

A análise do perfil conceitual da luz é particularmente relevante para o ensino de óptica, pois permite que estudantes e educadores compreendam as múltiplas interpretações e os diferentes níveis de significado que os conceitos científicos podem assumir. Reconhecer essa evolução possibilita uma abordagem mais rica e contextualizada no ensino de Física, conectando os diferentes estágios do desenvolvimento científico aos seus contextos históricos e culturais.

Quadro 10: Proposta de perfil conceitual para o conceito de luz

ASPECTO ONTOLÓGICO	CATEGORIAS
Luz como parte de uma teoria da visão. A definição da sua natureza está atrelada ao olho.	i. Luz como fogo visual que parte do olho em direção ao objeto. Ou como combinação do fogo visual ocular com a luz diurna.
	ii. Luz é resultado da mediação de um meio inerte que transfere as qualidades do objeto ao olho. Negação do fogo visual.
	iii. Luz é resultado de um meio “senciente” que estende a percepção do olho até os objetos.
Luz como ente independente do olho. A sua definição é apresentada em linguagem matemática e seus limites de validade são verificados experimentalmente.	i. Luz como onda
	ii. Luz como partícula
	iii. Luz como objeto quântico

Fonte: Autor

