

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS SOROCABA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

Gustavo da Silva Rodrigues

Representações da natureza da luz para descrição do seu comportamento

Sorocaba

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS SOROCABA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

Gustavo da Silva Rodrigues

Representações da natureza da luz para descrição do seu comportamento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Federal de São Carlos, *Campus* Sorocaba, para obtenção do título de Licenciado em Física. Sorocaba, 27 de fevereiro de 2025.

Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza

Sorocaba

2025

Rodrigues, Gustavo da Silva

Representações da natureza da luz para descrição do seu comportamento / Gustavo da Silva Rodrigues -- 2025.
57f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): James Alves de Souza

Banca Examinadora: Airton Natanael Coelho Dias,
Johnny Vilcarromero Lòpez

Bibliografia

1. Dualidade onda-partícula. 2. Teorias da luz. 3. Ensino
de Física. I. Rodrigues, Gustavo da Silva. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA - SOROCABA - CCFL-So/CCTS

Rod. João Leme dos Santos km 110 - SP-264, s/n - Bairro Itinga, Sorocaba/SP, CEP 18052-780

Telefone: (15) 32298859 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 3/2025/CCFL-So/CCTS

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

GUSTAVO DA SILVA RODRIGUES

REPRESENTAÇÕES DA NATUREZA DA LUZ PARA DESCRIÇÃO DO SEU COMPORTAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba

Sorocaba, 27 de fevereiro de 2025

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Prof. Dr. James Alves de Souza
Membro da Banca 1	Prof. Dr. Airton Natanael Coelho Dias
Membro da Banca 2	Prof. Dr. Johnny Vilcarromero Lòpez



Documento assinado eletronicamente por **James Alves de Souza, Docente**, em 27/02/2025, às 19:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Airton Natanael Coelho Dias, Docente**, em 05/03/2025, às 07:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Johnny Vilcarromero Lopez, Chefe de Departamento**, em 12/03/2025, às 20:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1758706** e o código CRC **B4D1AE50**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.005336/2025-63

SEI nº 1758706

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA - SOROCABA - CCFL-So/CCTS
 Rod. João Leme dos Santos km 110 - SP-264, s/n - Bairro Itinga, Sorocaba/SP, CEP 18052-780
 Telefone: (15) 32298859 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-ADP nº 3/2025/CCFL-So/CCTS

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso
Ata da Defesa Pública (GDP-TCC-ADP)

Aos vinte e sete dias do mês de fevereiro de 2025, nas dependências do prédio CCTS, realizou-se a Defesa Pública do Trabalho de Conclusão de Curso do (a) estudante Gustavo da Silva Rodrigues do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba, devidamente matriculado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, perante a Banca Examinadora, composta pelos Professores: Prof. Dr. James Alves de Souza, Prof. Dr. Airton Natanael Coelho Dias e Prof. Dr. Johnny Vilcarromero Lòpez, segundo o estabelecido nas Normas para apresentação de Trabalho de Conclusão do Curso.

Após a apresentação e arguições, a Banca deliberou, segundo os critérios estabelecidos nas normas supracitadas:

Nome do Docente	Função	Nota
Prof. Dr. James Alves de Souza	Orientador	9,0
Prof. Dr. Airton Natanael Coelho Dias	Membro da Banca 1	9,0
Prof. Dr. Johnny Vilcarromero Lòpez	Membro da Banca 2	9,0

Com isso, o Trabalho foi considerado **APROVADO**, com nota final **9,0 (NOVE)**.

Sorocaba, 27 de fevereiro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **James Alves de Souza, Docente**, em 27/02/2025, às 19:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Airton Natanael Coelho Dias, Docente**, em 05/03/2025, às 07:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Johnny Vilcarromero Lopez, Chefe de Departamento**, em 12/03/2025, às 20:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1758701** e o código CRC **E15B0F56**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.005336/2025-63

SEI nº 1758701

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Ata, versão de 02/Agosto/2019

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, agradeço a Deus e aos meus guias, que sempre estão comigo me dando força para que eu siga meu caminho.

Aos meus pais, Anderson Rodrigues e Luana Aparecida da Silva Rodrigues, pelo amor e apoio durante toda minha vida. Sem vocês, nada disso seria possível.

Aos meus irmãos, Heloá da Silva Rodrigues e Felipi da Silva Rodrigues, pelas palavras de carinho durante toda minha jornada no curso. Vocês sempre estarão no meu coração.

Ao meu orientador, Professor Dr. James Alves de Souza, pelas orientações e paciência durante a realização deste trabalho e principalmente, durante todo o curso. Agradeço por ter aceitado minha ideia e ter compartilhado seu valioso conhecimento e tempo comigo.

Aos professores, escolhidos por mim, para avaliar meu trabalho, Airton Natanael Coelho Dias, Letícia Estevão Moraes, Johnny Vilcarromero Lopez e Rafael Henriques Longaresi, por aceitarem o convite e dedicarem seu tempo comigo. Com Airton, tive meu primeiro contato com o que apresento neste trabalho; com a Letícia, entendi melhor como a ciência evolui ao longo dos anos; com Johnny, consegui aprofundar meus conhecimentos em Física Moderna; e com Rafael, tive um grande e importante apoio durante todo o curso.

Aos meus colegas e amigos, principalmente o Gabriel Torres Cavalcante Barros, que me acompanhou durante todo curso e concluirá sua graduação junto a mim.

Aos professores e funcionários da UFSCar Sorocaba, que fizeram parte da minha formação.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. A cada um de vocês, meu sincero muito obrigado.

“O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são.”

Aristóteles

Resumo

Um dos princípios mais fundamentais e antigos da mecânica quântica é a dualidade onda-partícula. Esse conceito estabelece que a luz pode se comportar tanto como uma onda quanto como uma partícula, dependendo das condições do experimento. Da mesma forma, partículas subatômicas, como os elétrons, exibem características tanto de partículas quanto de ondas, desafiando as concepções clássicas sobre a natureza da matéria e da radiação. O estudo da natureza da luz tem sido um tema central na física desde a antiguidade, motivando debates e avanços científicos ao longo da história. Neste trabalho, apresentamos teoricamente as representações corpuscular e ondulatória para a descrição da natureza e do comportamento da luz e como estas evoluíram ao longo do tempo. A metodologia adotada para isso inclui a definição dos conceitos de onda e partícula, a contextualização histórica de cada teoria, a apresentação dos princípios fundamentais, a dedução das fórmulas matemáticas associadas, as limitações de cada abordagem e o que é a dualidade onda-partícula. Através de uma revisão bibliográfica, buscamos demonstrar o entendimento sobre a abordagem do comportamento da luz no ensino de física, com o objetivo de proporcionar uma compreensão mais robusta dos conceitos físicos envolvidos e suas aplicações tecnológicas. Adicionalmente, discutimos sugestões para a inclusão do tema da dualidade da luz no currículo do ensino básico, visando uma melhor preparação dos alunos para os desafios do conhecimento científico contemporâneo.

Palavras-chave: Dualidade onda-partícula, Mecânica Quântica, Comportamento da luz, Ensino de Física, Teorias da luz.

Abstract

One of the most fundamental and earliest principles of quantum mechanics is wave-particle duality. This concept establishes that light can behave as either a wave or a particle, depending on the conditions of the experiment. Likewise, subatomic particles, such as electrons, exhibit characteristics of both particles and waves, challenging classical conceptions about the nature of matter and radiation. The study of the nature of light has been a central theme in physics since ancient times, motivating debates and scientific advances throughout history. In this work, we theoretically presented the corpuscular and wave representations to describe the nature and behavior of light and how they have evolved over time. The methodology adopted includes the definition of the concepts of wave and particle, the historical contextualization of each theory, the presentation of the fundamental principles, the deduction of the associated mathematical formulas, the limitations of each approach, and an explanation of what wave-particle duality is. Through a literature review, we aim to present an understanding of the way in which the behavior of light is approached in physics education, in order to foster a deeper comprehension of the related physical concepts and their technological applications. Furthermore, we discussed suggestions for including the duality of light subjects in the basic education curriculum, aiming at better preparing students for the challenges of contemporary scientific knowledge.

Keywords: Wave-particle duality, Quantum Mechanics, Behavior of light, Physics Teaching, Theories of light.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Duas cargas pontuais q_1 e q_2 , localizadas nas posições \vec{r}_1 e \vec{r}_2 , respectivamente, em relação à origem O de um sistema de coordenadas cartesiano (x, y, z) . O vetor é dado por $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, cujo versor é dado por $\hat{r} = \vec{r}/r$, define a linha de ação das força elétrica e gravitacional entre as cargas q_1 e q_2 , cujas respectivas massas são m_1 e m_2	16
Figura 2 – Ilustração da interferência construtiva e destrutiva de duas ondas transversais individuais.	19
Figura 3 – Ilustração do fenômeno de difração, mostrando uma onda passando por duas aberturas de dimensões comparáveis ao seu comprimento de onda λ	20
Figura 4 – Representação do Princípio de Huygens na propagação de uma onda plana.	27
Figura 5 – Representação de como Huygens explicou a reflexão e refração da luz entre dois meios diferentes 1 e 2, com o raio incidente formando um ângulo θ_i com a normal N , igual ao ângulo de reflexão θ_r e diferente do ângulo de refração θ_t	28
Figura 6 – Representação do Experimento da dupla fenda de Young, mostrando a luz passando pela primeira abertura S_0 se difratando e passando por mais duas aberturas S_1 e S_2 no segundo anteparo. Os dois feixes emergentes difratam e se interferem formando uma padrão de franjas claras e escuras no terceiro anteparo.	33
Figura 7 – Representação do Efeito Fotoelétrico.	44

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	OS CONCEITOS CLÁSSICOS DE PARTÍCULA E ONDA	14
2.1	Partículas	14
2.2	Ondas	17
3	TEORIA CORPUSCULAR DA LUZ DE NEWTON	21
3.1	Definição, evidências e implicações	22
3.2	Limitações	24
4	TEORIA ONDULATÓRIA DA LUZ DE HUYGENS	26
4.1	Definição, evidências e implicações	26
4.2	Limitações	29
4.3	Contribuições de Young e Fresnel	31
5	CONFIRMAÇÃO DO COMPORTAMENTO ONDULATÓRIO DA LUZ POR MAXWELL	34
5.1	Definição, evidências e implicações	35
5.2	Limitações	40
6	RUPTURA COM A FÍSICA CLÁSSICA E O SURGIMENTO DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA	42
6.1	Explicação da Radiação de Corpo Negro por Planck	42
6.2	Descrição Corpuscular da luz por Einstein	44
6.2.1	Definição, evidências e implicações	44
6.2.2	Limitações	46
6.3	O que é a dualidade onda-partícula?	48
7	POSSIBILIDADES SOBRE O ENSINO DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA NO NÍVEL MÉDIO	51
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54

REFERÊNCIAS 56

1 Introdução

A luz é um dos fenômenos mais fundamentais da natureza, desempenhando um papel central não apenas na vida cotidiana, mas também no desenvolvimento do conhecimento científico. Sua investigação ao longo da história proporcionou avanços na Física, permitindo a formulação de teorias que explicam seu comportamento e suas interações com a matéria. Além das implicações teóricas, o estudo da luz tem sido importante para o desenvolvimento de tecnologias, como a óptica, os lasers e os dispositivos fotônicos, que são amplamente aplicados em diversas áreas, desde a medicina até as telecomunicações (SILVA, 2015).

O debate sobre a verdadeira natureza da luz remonta à antiguidade, quando filósofos e estudiosos buscavam compreender sua origem e propagação. No entanto, foi apenas com o avanço do método científico que teorias mais elaboradas começaram a surgir. No século XVII, Isaac Newton propôs a teoria corpuscular da luz, sugerindo que a luz era composta por pequenas partículas emitidas por corpos luminosos. Essa ideia permitiu explicar diversos fenômenos, como a propagação retilínea e a reflexão, mas encontrou dificuldades em justificar a difração e a interferência (MARTINS; SILVA, 2015).

Por outro lado, Christiaan Huygens, contemporâneo de Newton, apresentou uma explicação alternativa baseada na hipótese ondulatória. Segundo Huygens, a luz se comportava como uma onda, o que permitia explicar fenômenos que a teoria corpuscular não conseguia. No entanto, como as ondas conhecidas na época necessitavam de um meio material para se propagar, essa teoria enfrentou questionamentos, já que não se conhecia um meio adequado para a propagação da luz no vácuo (KRAPAS; QUEIROZ; UZÊDA, 2011).

A confirmação da natureza ondulatória da luz veio com os experimentos de Thomas Young, no início do século XIX, e foi reforçada pelas equações de James Clerk Maxwell, que demonstraram que a luz era uma onda eletromagnética. Essa descoberta marcou um grande avanço para a Física, unificando os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos em uma única teoria. Entretanto, mesmo com esse progresso, alguns fenômenos observados no final do século XIX e início do século XX, como a radiação de corpo negro e o efeito fotoelétrico, não podiam ser explicados pela teoria ondulatória clássica (SILVA, 2009;

LIMA, 2019).

Foi nesse contexto que Max Planck introduziu, em 1900, a ideia de quantização da energia ao estudar a radiação de corpo negro. Planck propôs que a energia dos osciladores responsáveis pela emissão de radiação não poderia assumir valores arbitrários, mas sim múltiplos inteiros de um valor mínimo proporcional à frequência da radiação. Essa hipótese, inicialmente vista como um artifício matemático, marcou o nascimento da teoria quântica (SILVA, 2015).

Poucos anos depois, Albert Einstein utilizou a ideia de quantização de Planck para explicar o efeito fotoelétrico, propondo que a luz não apenas interagia com a matéria de forma quantizada, mas também era composta por *quanta* de energia, os fótons. Essa abordagem deu origem à noção da dualidade onda-partícula, um dos conceitos fundamentais da Física Quântica. De acordo com essa ideia, a luz pode apresentar características tanto de onda quanto de partícula, dependendo das condições do experimento realizado. Essa dualidade não apenas revolucionou a forma como compreendemos a luz, mas também abriu caminho para o desenvolvimento de novas tecnologias, como os semicondutores e a computação quântica (CARUSO; OGURI, 2021; LIMA, 2019).

Diante desse contexto, neste trabalho apresentamos e discutimos a evolução das principais teorias que descrevem a luz, destacando seus fundamentos, evidências experimentais e limitações. Além disso, será discutido o conceito de dualidade onda-partícula e sua relevância para a física contemporânea. Por fim, será abordada a viabilidade do ensino desse tema na educação básica, considerando sua importância na formação científica dos estudantes.

Para alcançar esses objetivos, este trabalho está estruturado em capítulos que abordam, primeiramente, os conceitos clássicos de partícula e onda, seguidos pelas teorias corpuscular e ondulatória da luz. Na sequência, apresentamos as contribuições de Maxwell e a formulação da teoria eletromagnética da luz, culminando na introdução da descrição corpuscular de Einstein. Por fim, foi discutida a relevância da dualidade onda-partícula e suas implicações para a Física e o ensino.

2 Os conceitos clássicos de partícula e onda

Na teoria clássica da Física, ondas e partículas são descritas como entidades distintas, cada uma com propriedades bem definidas. As partículas, como pequenos corpos materiais, possuem massa, posição e trajetória bem determinadas, obedecendo às leis da mecânica newtoniana. Já as ondas são perturbações que se propagam em um meio, como o ar ou o vácuo, caracterizadas por frequência, comprimento de onda e interferência. Essa distinção parecia inquestionável até o início do século XX, quando experimentos revelaram que a luz e a matéria podem exibir simultaneamente propriedades ondulatórias e corpusculares, desafiando a separação rígida entre esses conceitos. Nesta seção apresentamos em maiores detalhes como partículas e ondas são classificadas classicamente.

2.1 Partículas

Na Física, uma partícula é descrita como um objeto caracterizado por propriedades bem definidas. As características mais importantes de uma partícula são sua massa, posição, velocidade e aceleração. Uma partícula pode ser um objeto microscópico como um elétron ou um átomo ou um objeto macroscópico como uma bola de tênis ou uma pedra.

Toda partícula possui uma massa intrínseca, que é uma medida de sua inércia ou resistência à aceleração. Em sistemas não relativísticos, onde as velocidades das partículas envolvidas são muito menores em relação à velocidade da luz no vácuo, a massa de um objeto é considerada constante e não varia com a velocidade da partícula. Além disso, em um dado instante de tempo, uma partícula ocupa uma posição específica no espaço. À medida que o tempo avança, a partícula segue uma trajetória bem definida e contínua. Se as forças atuantes e as condições iniciais forem conhecidas, essa trajetória pode ser prevista com precisão por meio das leis da Mecânica Clássica, em particular, as leis de Newton do movimento (NUSSENZVEIG, 2002). Em outras palavras, uma consequência fundamental dessas leis é que o movimento de uma partícula é determinístico.

Outro conceito básico da mecânica clássica e que é uma propriedade fundamental associada com uma partícula é o seu momento linear \vec{p} . O momento de um objeto de

massa m e velocidade \vec{v} é definido por:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (2.1)$$

A importância física desta quantidade é a sua estreita relação com a força. A força aplicada em uma partícula é definida como a taxa com que o momento varia, ou seja,

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{dm}{dt}\vec{v} + m\frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (2.2)$$

Para uma partícula com massa constante, obtemos a relação usualmente utilizada no ensino básico, que é uma forma aproximada da segunda lei de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$, em que $\vec{a} = d\vec{v}/dt$ é a aceleração da partícula.

As partículas interagem entre si por meio de forças. Essas forças podem ter diferentes naturezas, como gravitacional, eletromagnética ou nuclear. As leis da Física Clássica, como a lei da gravitação de Newton e a lei de Coulomb, descrevem como calcular a força entre partículas (NUSSENZVEIG, 2002).

Em um contexto onde temos a interação entre duas cargas pontuais q_1 e q_2 isoladamente, sob a ação exclusiva da força elétrica que uma exerce sobre a outra, com os vetores \vec{r}_1 e \vec{r}_2 descrevendo, respectivamente, suas posições em relação à origem O de um sistema de coordenadas cartesiano (x, y, z) , conforme ilustrado na figura 1, a força entre q_1 e q_2 é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Na nossa representação, esta distância é descrita pelo vetor $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, cujo versor é dado por $\hat{r} = \vec{r}/r$. Este também define a linha de ação da força elétrica de q_1 em relação a q_2 e vice-versa.

Considerando que \vec{r} inicia em q_1 e termina em q_2 , a força elétrica que a carga q_1 exerce na carga q_2 , descrita por \vec{F}_2 , é dada pela Lei de Coulomb, expressa por:

$$\vec{F}_2 = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}, \quad (2.3)$$

sendo $k_0 \approx 8,99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ a constante de Coulomb.

Se considerarmos a lei da gravitação universal para duas massas m_1 e m_2 , na mesma configuração da figura 1, a força gravitacional que a massa m_1 exerce em m_2 , a qual chamaremos de \vec{F}_{g2} , é descrita por:

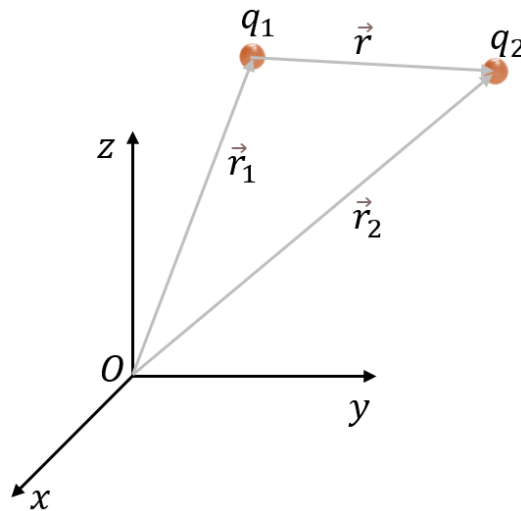
$$\vec{F}_{g2} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}, \quad (2.4)$$

sendo $G \approx 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ a constante gravitacional universal.

Outra importante propriedade das partículas é sua energia. Quando uma partícula livre não relativística de massa m está se movendo com velocidade \vec{v} , sua energia total é dada pela sua energia cinética, descrita por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2. \quad (2.5)$$

Figura 1 – Duas cargas pontuais q_1 e q_2 , localizadas nas posições \vec{r}_1 e \vec{r}_2 , respectivamente, em relação à origem O de um sistema de coordenadas cartesiano (x, y, z) . O vetor é dado por $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, cujo versor é dado por $\hat{r} = \vec{r}/r$, define a linha de ação das força elétrica e gravitacional entre as cargas q_1 e q_2 , cujas respectivas massas são m_1 e m_2 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando uma partícula não se move em linha reta, torna-se necessário definir novas grandezas para descrever seu movimento rotacional, como o momento de inércia I , a velocidade angular $\vec{\omega}$, a aceleração angular $\vec{\alpha}$ e o torque $\vec{\tau}$. Neste contexto, o análogo do momento linear $\vec{p} = m\vec{v}$ no movimento de rotação é o momento angular L , definido por:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}. \quad (2.6)$$

O momento angular de uma partícula também pode ser expresso em função de seu momento linear $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$. Tanto o momento linear quanto o angular são grandezas vetoriais conservadas em sistemas isolados. Esse princípio de conservação é fundamental para a compreensão de diversos fenômenos naturais, como o movimento de planetas em torno de estrelas, a estabilidade de sistemas livres de forças externas, a interação entre elétrons e seus núcleos atômicos, entre outros (ROCHA, 2002).

2.2 Ondas

Ondas são perturbações que se propagam através de diversos meios e estão presentes em uma ampla variedade de sistemas físicos. Um exemplo intuitivo desse fenômeno pode ser observado quando uma pedra é lançada na superfície de um lago com a água parada. A queda da pedra gera perturbações periódicas na superfície da água que se espalham a partir do ponto de impacto. Esse comportamento ilustra a propagação das ondas na água, mas há muitos outros tipos de ondas, como as sonoras e as eletromagnéticas, incluindo a luz. Nesta seção, exploramos as principais características das ondas.

Para descrever geometricamente uma onda como uma perturbação que se propaga através de um meio ou do espaço, nós a representamos matematicamente pela função de onda clássica:

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \varphi), \quad (2.7)$$

em que A é a amplitude, k é o número de onda, ω é a frequência angular, t é o tempo, x é a posição e φ é a fase inicial da onda (MAIA, 2017).

A equação (2.7) representa uma onda se propagando na direção positiva do eixo- x . O número de onda também pode ser expresso em função do comprimento de onda λ da onda, por $k = 2\pi/\lambda$. De maneira análoga, a frequência angular pode ser reescrita em função da frequência real f , medida em hertz (Hz), ou do período da onda T , por $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$. O período T é o tempo que leva para a onda completar um ciclo, ou seja, para que um ponto do meio volte à mesma fase de oscilação. Durante esse intervalo de tempo, a onda se propaga por uma distância igual ao seu comprimento de onda λ (NUSSENZVEIG, 2002). A partir disso, podemos calcular a velocidade v de propagação da onda, ou sua velocidade de fase,

$$\begin{aligned} v &= \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda\omega}{2\pi} \\ \therefore v &= \frac{\omega}{k}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

A relação (2.8) é conhecida como *relação de dispersão*.

Uma forma conveniente de representar a função de onda (2.7) é descrevê-la em termos da notação complexa,

$$y(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t + \varphi)}. \quad (2.9)$$

A utilidade desta notação reside no fato de podermos representar a onda como um ponto no plano complexo, em vez de uma descrição senoidal completa, como na equação (2.7).

Existem dois tipos principais de ondas: longitudinais e transversais. Ondas longitudinais são aquelas em que a oscilação do meio é paralela à direção de propagação da onda, como as ondas sonoras. Ondas transversais são aquelas em que a oscilação do meio é perpendicular à direção de propagação da onda, como as ondas em uma corda ou as ondas eletromagnéticas, incluindo a luz (PIUBELLI et al., 2010).

Uma propriedade importante de qualquer tipo de onda é que, quando duas ou mais ondas chegam ao mesmo ponto, elas se sobrepõem uma à outra. Isso é chamado de *princípio de superposição*. Este é um princípio muito importante e possui várias aplicações, particularmente na compreensão dos fenômenos de interferência e difração.

A interferência e a difração são características fundamentais das ondas. A interferência ocorre quando duas ou mais ondas se sobrepõem, produzindo uma nova distribuição de amplitude resultante da soma das contribuições individuais. Já a difração é o fenômeno pelo qual as ondas contornam obstáculos e se espalham ao atravessar aberturas (NUSSENZVEIG, 2002).

Na interferência, quando duas ou mais ondas de luz se encontram, podem ocorrer dois tipos principais de superposição: interferência construtiva e interferência destrutiva. Na interferência construtiva, as ondas estão em fase, ou seja, seus picos e vales coincidem, resultando em um aumento da amplitude e, conseqüentemente, da intensidade da luz. Já na interferência destrutiva, as ondas estão em oposição de fase, com os picos de uma coincidindo com os vales da outra, levando a uma redução ou até ao cancelamento total da amplitude e da intensidade da luz (MOURA, 2016). Na figura 2, à esquerda, é ilustrado o fenômeno de interferência construtiva, e à direita, a interferência destrutiva.

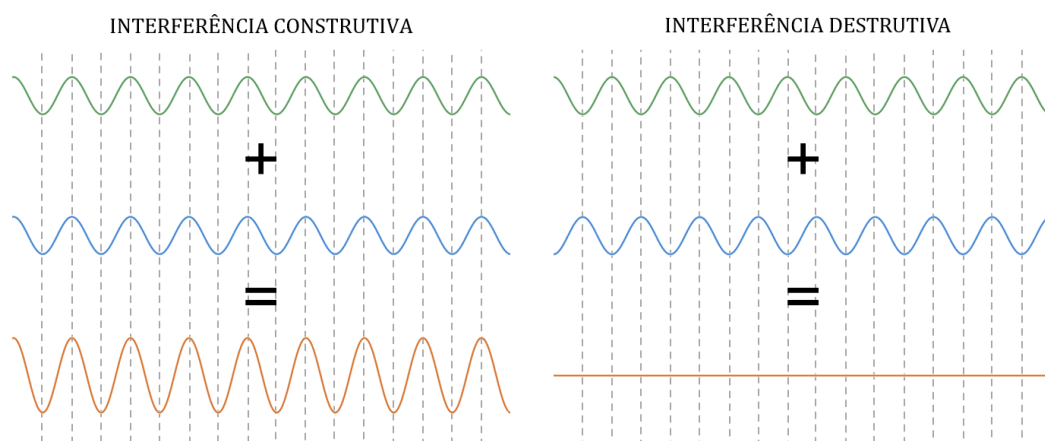
O princípio de superposição para as duas ondas ilustradas na figura 2, cujas funções de onda podem ser descritas por $y_1(x, t)$ e $y_2(x, t)$, estabelece que a função da onda resultante $y(x, t)$ é dada por:

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t). \quad (2.10)$$

A difração é um fenômeno óptico que ocorre quando uma onda interage com um obstáculo ou atravessa uma abertura cujas dimensões são comparáveis ao seu comprimento

de onda. Esse processo provoca um desvio na trajetória original da onda, fazendo com que ela se espalhe ao invés de seguir em linha reta. A intensidade desse efeito depende da relação entre o comprimento de onda λ e as dimensões do obstáculo ou da abertura: quanto maior o comprimento de onda em relação à abertura, mais acentuada será a difração. Por exemplo, a luz vermelha, que possui um comprimento de onda maior que o da luz azul, sofre uma difração mais intensa ao passar por uma fenda estreita (NUSSENZVEIG, 2002). A figura 3 ilustra esse fenômeno, evidenciando o espalhamento da onda ao atravessar duas aberturas com dimensões diferentes.

Figura 2 – Ilustração da interferência construtiva e destrutiva de duas ondas transversais individuais.

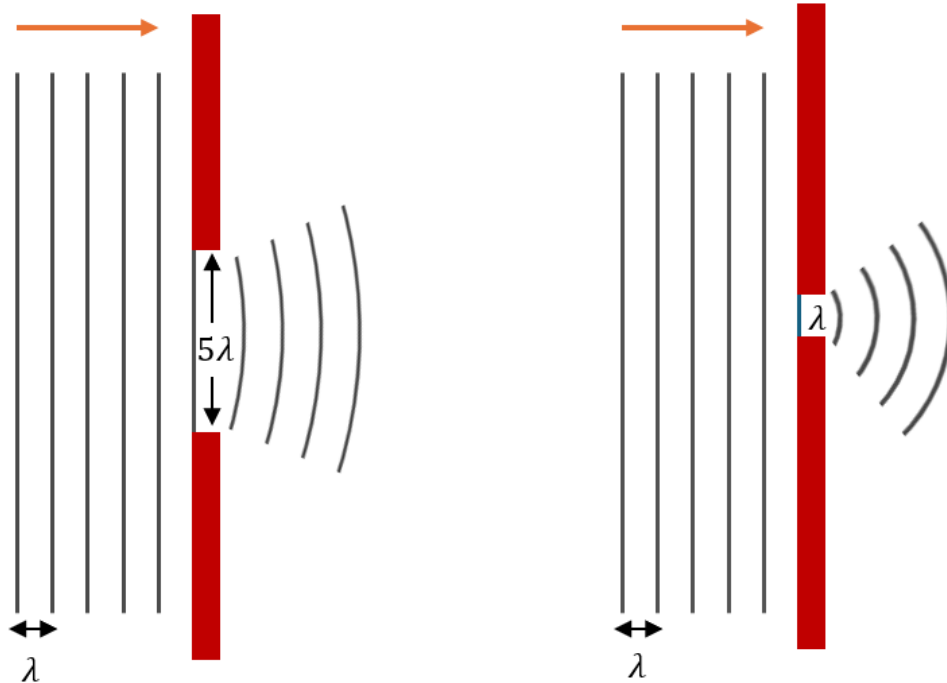


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na abordagem ondulatória, temos dois conceitos: óptica geométrica e óptica física. A óptica geométrica trata da propagação de ondas em linha reta, sendo uma aproximação válida quando as dimensões dos objetos ou aberturas com as quais a onda interage são muito maiores que o seu comprimento de onda. Dentro dessa perspectiva, fenômenos como a reflexão e a refração podem ser entendidos como consequências da interação da frente de onda com superfícies de separação entre diferentes meios, sem a necessidade de considerar explicitamente a natureza ondulatória em detalhes. Por outro lado, a óptica física se dedica ao estudo dos fenômenos que só podem ser explicados levando em consideração a natureza ondulatória da propagação, como a difração e a interferência. A difração ocorre quando uma onda encontra um obstáculo ou uma abertura com dimensões comparáveis ao seu comprimento de onda, resultando no desvio da trajetória da onda e seu espalhamento. A interferência é o fenômeno de superposição de duas ou mais ondas que se encontram, resultando em padrões de intensidades reforçadas (interferência construtiva)

ou enfraquecidas (interferência destrutiva) (ROCHA, 2002).

Figura 3 – Ilustração do fenômeno de difração, mostrando uma onda passando por duas aberturas de dimensões comparáveis ao seu comprimento de onda λ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 3, observa-se que o espalhamento da onda, ou sua difração, é mais pronunciado quando a abertura é menor. Especificamente, a representação à direita exibe uma curvatura mais acentuada das frentes de onda em comparação com a imagem à esquerda. Isso ocorre porque a difração se torna mais intensa à medida que o tamanho da fenda se aproxima do comprimento de onda da onda incidente. No caso ilustrado, a abertura à esquerda possui um tamanho de 5λ , resultando em um espalhamento menos significativo, enquanto a abertura à direita tem um tamanho de λ , gerando uma difração muito mais perceptível.

3 Teoria Corpuscular da Luz de Newton

Isaac Newton é amplamente reconhecido por sua teoria corpuscular da luz, que postulava que a luz era composta por partículas minúsculas. No entanto, a gênese e a evolução dessa teoria ocorreram em um contexto histórico complexo, influenciado por debates científicos e filosóficos da época. Newton não foi o primeiro a propor uma teoria corpuscular da luz, mas suas ideias foram moldadas por seus estudos, observações e interações com outros pensadores (MARTINS; SILVA, 2015).

No século XVII, o mecanicismo era um modelo de explicação muito influente na filosofia natural. Esse modelo buscava explicar os fenômenos naturais em termos de interações mecânicas entre partículas de matéria. A influência do mecanicismo sobre Newton é evidente em seus trabalhos sobre óptica, onde ele buscou explicar os fenômenos luminosos por meio de leis e princípios da mecânica (SILVA, 2007).

Newton, desde seus primeiros anos como estudante, se dedicou ao estudo da óptica. Ele realizou experimentos com prismas, observou a decomposição da luz branca em diferentes cores e formulou hipóteses sobre a natureza da luz. Newton registrou seus pensamentos e observações sobre a luz em seu caderno de anotações, “*Quaestiones quaedam philosophicae*” (Certas questões filosóficas) (NEWTON, 1664). Nesse caderno, já se observa sua inclinação para uma concepção corpuscular da luz, rejeitando a ideia de que a luz seria um tipo de pressão propagada através de um meio (MOURA, 2016).

Em 1666, Newton escreveu um ensaio intitulado “*Of colours*” (Sobre as cores) (NEWTON, 1704a), no qual descreveu seus experimentos com prismas e apresentou sua teoria sobre a luz branca como uma mistura de raios coloridos. Ele também investigou a formação de anéis coloridos em filmes finos, fenômeno que seria posteriormente conhecido como “anéis de Newton”. Esses trabalhos iniciais demonstram o interesse de Newton em compreender os fenômenos ópticos e sua busca por explicações baseadas em princípios físicos e matemáticos (MOURA, 2016).

Em 1672, Newton publicou seu primeiro artigo científico, intitulado “*New theory about light and colors*” (Nova teoria sobre luz e cores) (NEWTON, 1672), na revista científica *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Neste artigo, ele apresentou sua

teoria sobre a composição da luz branca e a refrangibilidade¹ diferente de cada cor. Essa publicação gerou debates e críticas de outros cientistas, como Robert Hooke e Christiaan Huygens, que defendiam uma teoria ondulatória da luz (MARTINS; SILVA, 2015).

A resposta de Newton às críticas recebidas, principalmente de Hooke, é um ponto importante para entender a evolução de sua teoria corpuscular. Embora reconhecesse a existência de aspectos ondulatórios na luz, Newton enfatizava que considerava a luz como composta por corpúsculos. Ele argumentava que essa concepção era uma consequência de sua teoria, e não uma hipótese arbitrária (SILVA, 2009).

O trabalho de Huygens sobre óptica, “*Traité de la lumière*” (Tratado sobre a Luz) (HUYGENS, 1690), foi publicado em 1690, alguns anos após a publicação de Newton. Não houve nenhuma disputa direta ou um confronto acirrado entre Newton e Huygens, como muitas vezes é retratado em livros didáticos. Os dois cientistas se corresponderam e trocaram ideias sobre seus trabalhos (MOURA, 2016).

A publicação do livro “*Opticks*” (Óptica) (NEWTON, 1704b), em 1704, consolidou a teoria corpuscular de Newton e influenciou o desenvolvimento da óptica durante o século XVIII. Essa obra, escrita em inglês e com um estilo mais acessível do que os “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*” (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural) (NEWTON, 1687), ou simplesmente “*Principia*”, de 1687, popularizou as ideias de Newton sobre a luz (MARTINS; SILVA, 2015).

A aceitação da teoria corpuscular no século XVIII foi impulsionada pela autoridade de Newton, especialmente após o sucesso do livro “*Principia*”, que estabelece as bases da mecânica clássica. Os seguidores de Newton, em sua maioria, não questionaram criticamente os pontos fracos de sua teoria da luz, aceitando suas ideias como verdades absolutas (SILVA, 2008).

3.1 Definição, evidências e implicações

A teoria corpuscular da luz, proposta por Isaac Newton, postula que a luz é formada por minúsculas partículas discretas chamadas corpúsculos. Essas partículas se propagam

¹ A refrangibilidade refere-se à capacidade de a luz sofrer refração ao passar de um meio para outro. No contexto da teoria de Newton, diferentes cores apresentam diferentes índices de refração, o que significa que cada cor é desviada em um ângulo distinto ao atravessar um prisma, resultando na dispersão da luz branca.

em linha reta e em alta velocidade a partir de fontes luminosas, como o Sol ou uma chama. Newton desenvolveu essa teoria para explicar diversos fenômenos ópticos observados em sua época. No entanto, seu modelo foi eficaz apenas na explicação da reflexão, refração e dispersão da luz, sem fornecer uma descrição completa de outros fenômenos ópticos (MOURA, 2016).

Em relação à reflexão da luz, Newton propôs que os corpúsculos eram defletidos ao atingir uma superfície, de maneira semelhante a uma bola de tênis rebatendo em uma mesa. Segundo esse modelo, a componente vertical da velocidade do corpúsculo era invertida ao colidir com a superfície, enquanto a componente horizontal permanecia inalterada, resultando na igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão. Embora essa explicação fosse bem-sucedida na descrição da reflexão especular, ela não abordava fenômenos como a reflexão parcial da luz (SILVA, 2008).

Para explicar a refração, Newton se inspirou nas ideias de Descartes, que afirmava que a velocidade dos corpúsculos de luz se alterava ao atravessar diferentes meios. Newton sugeriu que a refração não ocorria de forma abrupta, mas sim gradualmente, fazendo com que os raios de luz descrevessem uma curva ao se aproximar e atravessar a interface entre dois meios. Além disso, ele estabeleceu uma relação entre a cor da luz e sua refrangibilidade, mostrando que diferentes cores sofrem diferentes desvios ao passar por um prisma. No entanto, esse modelo apresentava inconsistências quando considerado à luz da hipótese de que a matéria era composta por átomos e vazios, o que limitava sua aplicabilidade (MARTINS; SILVA, 2015).

Já a dispersão da luz branca foi explicada por Newton a partir de seus experimentos com prismas. Ele demonstrou que a luz branca era composta por diferentes cores, cada uma sofrendo um grau diferente de refração ao passar pelo prisma. Com isso, ele conseguiu separar as cores do espectro visível e mostrar que essas cores eram propriedades da luz, e não alterações causadas pelo prisma, como se acreditava antes (MARTINS; SILVA, 2015).

Newton se baseou na observação da propagação retilínea da luz como evidência para sua teoria corpuscular. Ele argumentava que se a luz fosse uma onda, ela deveria se curvar ao passar por obstáculos, como ocorre com as ondas sonoras. No entanto, a luz parecia se propagar em linha reta, o que, para Newton, sugeria um comportamento similar ao de partículas em movimento (MARTINS; SILVA, 2015).

A teoria corpuscular de Newton impulsionou o desenvolvimento de instrumentos ópticos, como telescópios e microscópios, que contribuíram para avanços em astronomia e biologia. A compreensão da dispersão da luz permitiu a construção de instrumentos mais precisos e a realização de novas descobertas. O estudo da luz e das cores teve implicações na arte e na percepção visual (SILVA, 2008).

3.2 Limitações

Apesar de sua influência, a teoria corpuscular de Newton também gerou controvérsias e debates entre os cientistas da época. As críticas de Hooke e Huygens, defensores da teoria ondulatória, colocaram em evidência as dificuldades da teoria corpuscular em explicar fenômenos como a difração, a polarização e a interferência da luz. Esses debates estimularam a realização de novos experimentos e a busca por teorias mais abrangentes sobre a natureza da luz (MARTINS; SILVA, 2015).

A difração, que Newton chamou de “inflexão” da luz, foi interpretada por ele como o resultado de forças que desviavam a luz quando ela passava perto das bordas de orifícios ou corpos sólidos. Newton não conseguiu determinar as leis da difração nem oferecer uma explicação satisfatória para o fenômeno, e não fez proposições a respeito em seu livro *Óptica*. Embora tenha notado que a luz conseguia penetrar, ainda que de maneira fraca, nas regiões de sombra, ele não desenvolveu uma teoria mais aprofundada para esse fenômeno (MOURA, 2016).

Quanto à polarização, que se refere à orientação preferencial das oscilações das ondas de luz em uma direção específica, Newton não apresentou uma explicação direta. No entanto, ele observou que os dois feixes de luz, quando separados por um cristal de calcita, apresentavam propriedades ópticas distintas, as quais ele denominou de “lados” diferentes nos raios de luz. Ele notou que essas propriedades eram conservadas após a luz sair do cristal e que a luz parecia possuir diferentes “lados”. A comparação feita por Newton com os polos de um ímã originou o termo polarização. No entanto, Newton não foi capaz de conectar o fenômeno da polarização com sua teoria corpuscular da luz (MARTINS; SILVA, 2015).

Newton explicou a interferência, como vista nos anéis de Newton, através de um modelo em que a luz era composta por corpúsculos com “estados” de fácil reflexão e

fácil refração, que se alternavam periodicamente. Contudo, ele enfrentou dificuldade em explicar como os corpúsculos de luz poderiam ter esses estados alternados e não explicou a periodicidade observada experimentalmente (MARTINS; SILVA, 2015; SILVA, 2009).

Embora Newton tenha defendido a teoria corpuscular da luz com base em suas observações e experimentos, ele também reconheceu que a luz apresentava alguns aspectos ondulatórios. Em suas correspondências com outros cientistas, como Robert Hooke, Newton discutiu a possibilidade de que os corpúsculos de luz pudessem gerar vibrações no éter. O éter, em Física, era uma substância universal hipotética que acreditava-se atuar como meio de transmissão de ondas eletromagnéticas, como a luz e os raios-X, assim como as ondas sonoras são transmitidas por meios elásticos como o ar. Para a comunidade científica da época, o éter era uma substância leve, transparente, sem atrito, indetectável química ou fisicamente e, literalmente, permeava toda a matéria e o espaço (SILVA, 2009).

4 Teoria Ondulatória da Luz de Huygens

A teoria ondulatória da luz proposta por Christiaan Huygens no século XVII, surgiu em um contexto marcado pelo avanço do conhecimento científico e pela busca por explicações mecânicas para os fenômenos naturais. O século XVII foi um período de grande efervescência intelectual, com a publicação de trabalhos importantes em áreas como física, astronomia e matemática, impulsionados por figuras como Galileu Galilei, Johannes Kepler, René Descartes e Isaac Newton (SILVA, 2007).

Apesar de sua originalidade e do sucesso em explicar certos fenômenos, a teoria de Huygens foi inicialmente ofuscada pela influência da teoria corpuscular de Newton. A autoridade de Newton, consolidada após a publicação da obra “*Principia*”, contribuiu para a maior aceitação da teoria corpuscular entre os cientistas da época (MOURA, 2016).

No século XVIII, a teoria ondulatória de Huygens permaneceu em segundo plano, sendo pouco explorada e debatida. A hegemonia da física newtoniana durante esse período limitou o desenvolvimento de teorias alternativas sobre a natureza da luz. Apenas no século XIX, com o ressurgimento da teoria ondulatória impulsionada por cientistas como Thomas Young e Augustin-Jean Fresnel, a teoria de Huygens voltou a ser considerada (SILVA, 2009).

4.1 Definição, evidências e implicações

Christiaan Huygens, em seu “Tratado sobre a Luz” (HUYGENS, 1690) de 1690, propôs que a luz se propagava como uma onda, em contraste com a teoria corpuscular de Newton, que a descrevia como um fluxo de partículas. Huygens baseou sua teoria na analogia com a propagação do som, argumentando que a luz, assim como o som, precisaria de um meio material para se propagar. Ele postulou a existência do éter. Conforme já discutido, este era considerado como um meio sutil e onipresente, que serviria como suporte para as ondas de luz (NUSSENZVEIG, 2002).

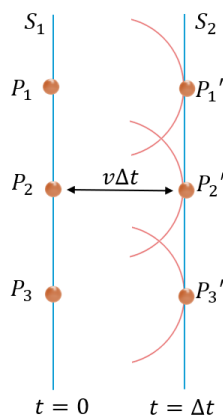
Para Huygens, a luz era constituída por pulsos não periódicos, ou seja, perturbações que se propagavam pelo éter sem uma frequência ou comprimento de onda definidos. Ele não utilizou os conceitos modernos de onda, como amplitude, período ou frequência, que

foram desenvolvidos posteriormente. Sua concepção de onda era mais próxima da ideia de um pulso, como a perturbação que se propaga na água quando uma pedra é lançada (MOURA, 2016).

Um dos pilares da teoria de Huygens era o princípio que leva seu nome: *Princípio de Huygens*. Este descreve como as ondas de luz se propagam através do éter, de maneira que cada ponto de uma frente de onda atua como uma fonte de ondas secundárias, que se espalham em todas as direções com a mesma velocidade e frequência da onda original (KRAPAS; QUEIROZ; UZÊDA, 2011).

A nova frente de onda é então determinada pela envoltória dessas ondas secundárias, ou seja, a superfície tangente a todas as ondas secundárias em um dado instante. Huygens utilizou esse princípio para explicar a propagação retilínea da luz, argumentando que, apesar das ondas secundárias se espalharem em todas as direções, apenas a envoltória contribui para a propagação da onda principal, como ilustrado na figura 4 (NUSSENZVEIG, 2002).

Figura 4 – Representação do Princípio de Huygens na propagação de uma onda plana.



Fonte: Elaborado pelo autor.

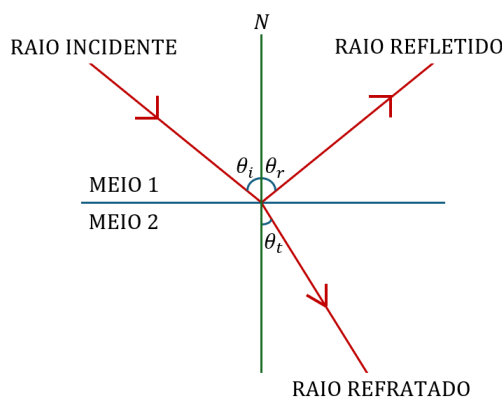
Considerando a frente de onda inicial na figura 4, representada pelo plano S_1 , qualquer ponto desse plano (como os pontos P_1 , P_2 e P_3) atua como uma fonte de ondas secundárias. Essas ondas secundárias se propagam na direção do avanço da onda principal e são ilustradas pelas semicircunferências na cor vermelha. Supondo que a velocidade de propagação no meio seja constante e denotada por v , e que o intervalo de tempo para a propagação de uma frente de onda para outra seja Δt , podemos observar que as ondas secundárias terão um raio de $v\Delta t$. A nova frente de onda, S_2 , será então a superfície

tangente a todas essas ondas secundárias (DIAS et al., 2014).

Este princípio também permitiu a Huygens explicar a reflexão e a refração da luz. Na reflexão, as ondas secundárias geradas na superfície de um espelho, por exemplo, formam uma nova frente de onda que se propaga com o ângulo de reflexão θ_r igual ao ângulo de incidência θ_i , em relação à normal do plano do espelho. Na refração, a mudança na velocidade da luz ao passar de um meio 1 para outro meio 2 provoca uma mudança na direção da propagação da onda, o que é explicado pela diferença na velocidade das ondas secundárias nos dois meios, como ilustrado na figura 5 (KRAPAS; QUEIROZ; UZÊDA, 2011).

Note que, na figura 5 ilustramos como Huygens explicou a reflexão e a refração da luz sem apresentar as ondas secundárias, mostrando apenas a direção de propagação da frente de onda incidente, refletida e refratada.

Figura 5 – Representação de como Huygens explicou a reflexão e refração da luz entre dois meios diferentes 1 e 2, com o raio incidente formando um ângulo θ_i com a normal N , igual ao ângulo de reflexão θ_r e diferente do ângulo de refração θ_t .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Huygens reconhecia a limitação da sua teoria em termos de evidências experimentais, como ele mesmo afirmou no início do seu *Tratado sobre a Luz*: “Como acontece em todas as ciências nas quais a geometria é aplicada à matéria, as demonstrações relativas à Óptica são fundamentadas sobre verdades tiradas da experiência” (HUYGENS, 1690).

No entanto, Huygens conseguiu explicar a refração da luz usando sua teoria ondulatória. Ele argumentou que a velocidade da luz é menor em meios mais densos, o que explicaria a mudança de direção de propagação observada. Essa explicação da refração era uma das principais evidências a favor da teoria ondulatória na época, já que a

teoria corpuscular de Newton tinha dificuldade em explicar esse fenômeno sem recorrer a hipóteses adicionais (KRAPAS; QUEIROZ; UZÊDA, 2011).

Huygens também se dedicou ao estudo da dupla refração em cristais de calcita. Ele observou que um único raio de luz incidente ao penetrar no cristal de calcita é dividido em dois raios refratados: um raio ordinário, que obedece às leis comuns da refração, e um raio extraordinário, que não segue nenhuma lei de refração conhecida naquele tempo. A observação desse comportamento incomum da luz ao passar pela calcita representou um desafio para as teorias ópticas existentes e se tornou um ponto central nas discussões sobre a natureza da luz (MOURA, 2016).

Para explicar a formação desses dois raios refratados, Huygens propôs que havia duas propagações diferentes dos pulsos de luz dentro do cristal. No caso da refração ordinária, Huygens imaginou que os pulsos luminosos se propagariam de maneira semelhante a ondas no éter presente no cristal. Já para a refração extraordinária, sua explicação envolvia a propagação dos pulsos como esferoides, não se restringindo apenas ao éter, mas também interagindo com as partículas do próprio cristal. Ao aplicar seu “princípio” a ambas as emanações dos raios, Huygens buscou demonstrar a validade e a coerência geral de sua teoria vibracional da luz em contraposição à concepção corpuscular (MOURA, 2016).

Embora a explicação de Huygens para a dupla refração tenha sido um importante pilar de sua teoria, ela não era capaz de explicar todos os aspectos do fenômeno, como as variações no comportamento dos raios ao passar por um segundo cristal de calcita com diferentes orientações. Contudo, sua investigação e descrição detalhada do fenômeno foram muito importantes para o avanço da óptica. (MOURA, 2016)

4.2 Limitações

A teoria ondulatória de Huygens, embora inovadora para a época, apresentava diversas limitações que se tornaram evidentes à medida que o estudo da óptica se aprofundava. A natureza do éter era um dos principais obstáculos, pois Huygens não conseguia explicar suas propriedades físicas de forma satisfatória, como sua densidade, elasticidade e interação com a matéria (SILVA, 2007).

Outra limitação importante da teoria de Huygens era a incapacidade de explicar o fenômeno da difração da luz. A difração, que envolve a curvatura das ondas ao

contornarem obstáculos e passar por aberturas, já era um fenômeno bem conhecido na época, mas Huygens não conseguiu incorporá-la adequadamente ao seu princípio das ondas secundárias. Sua construção geométrica, que visava explicar a propagação retilínea da luz, não contemplava a possibilidade de curvatura significativa das ondas, o que restringia a aplicabilidade do seu modelo (KRAPAS; QUEIROZ; UZÊDA, 2011).

A teoria de Huygens também não abordava a questão da polarização da luz. A polarização, que se refere à orientação das oscilações das ondas de luz, era um fenômeno ainda pouco compreendido no século XVII. A descrição de Huygens para a luz como pulsos não periódicos não permitia a incorporação do conceito de polarização, o que restringia a capacidade de sua teoria em explicar fenômenos como a dupla refração em cristais de forma completa (ARAÚJO; SILVA, 2009).

O fenômeno da interferência da luz, essencial para a compreensão da natureza ondulatória da luz, também não podia ser explicado pela teoria de Huygens. Sua descrição da luz como pulsos não periódicos propagados no éter não incluía conceitos como frequência, comprimento de onda e amplitude, que são fundamentais para entender como as ondas de luz se combinam, se reforçam ou se cancelam mutuamente. Huygens considerava as ondas luminosas como longitudinais, o que também dificultava a explicação da interferência, pois a combinação de ondas com essa característica não produz os padrões de interferência observados experimentalmente (MOURA, 2016).

Além disso, a teoria de Huygens não explicava a interação da luz com a matéria, como a absorção e a emissão de luz por átomos e moléculas. Essa limitação decorria da falta de uma teoria atômica bem estabelecida na época, o que impedia a compreensão dos mecanismos microscópicos da interação entre luz e matéria. Somente com o desenvolvimento da física quântica no século XX, que foi possível explicar a interação da luz com a matéria de forma satisfatória (SILVA, 2008).

É importante lembrar que a teoria ondulatória de Huygens foi desenvolvida em um contexto histórico em que o conhecimento sobre a luz e a matéria era ainda limitado. Apesar de suas limitações, a teoria de Huygens representou um avanço significativo na compreensão da natureza da luz, abrindo caminho para o desenvolvimento da óptica ondulatória nos séculos seguintes (MOURA, 2016).

4.3 Contribuições de Young e Fresnel

A falta de evidências experimentais mais robustas e a influência da teoria corpuscular de Newton limitaram a aceitação da teoria ondulatória de Huygens até o início do século XIX, quando experimentos sobre difração e interferência da luz, realizados por Young e Fresnel, trouxeram novas evidências a favor do comportamento ondulatório da luz (MOURA, 2016).

Em 1801, Thomas Young demonstrou o fenômeno da interferência da luz, um marco fundamental para o desenvolvimento da teoria ondulatória. No experimento, Young fez a luz solar passar por um orifício em uma placa opaca, de modo que a luz emergente, após ser difratada, incidiu sobre dois novos orifícios. Esse processo gerou novas ondas difratadas e a superposição dessas ondas resultou em um padrão de interferência projetado sobre um anteparo, com faixas claras e escuras alternadas. A análise desse padrão não apenas confirmou a natureza ondulatória da luz, como também permitiu a Young medir o comprimento de onda médio do espectro visível, proveniente da luz solar, estimado em 570 nm, um valor muito próximo ao atualmente aceito de 555 nm (SILVA, 2007).

A experiência de Young revelou que a luz, ao se propagar, exibe um comportamento ondulatório, com regiões de reforço e cancelamento de ondas, dependendo da diferença de caminho percorrido pelas ondas que se superpõem. Essa descoberta não apenas forneceu uma base experimental sólida para a teoria ondulatória, mas também permitiu a Young formular o *princípio da interferência*, que é uma aplicação específica do princípio da superposição. O princípio da interferência estabelece que, quando duas ondas coerentes (de mesma frequência) se combinam, a intensidade ou os deslocamentos das ondas são somados, levando em conta a diferença de fase entre elas. A onda resultante pode ter maior intensidade (interferência construtiva) ou menor amplitude (interferência destrutiva) dependendo se as ondas estão em fase ou fora de fase, respectivamente (ROCHA, 2002).

Augustin Fresnel, no início do século XIX, aprofundou o estudo da difração e da interferência, retomando as ideias ondulatórias de Huygens e aplicando o princípio da interferência para calcular matematicamente as figuras de difração em diversos obstáculos e aberturas. Ele conseguiu explicar a propagação retilínea da luz, que era uma das objeções à teoria ondulatória, demonstrando que a luz se propaga como uma onda e também que a difração é um fenômeno que só se torna mais visível quando a luz passa por aberturas ou

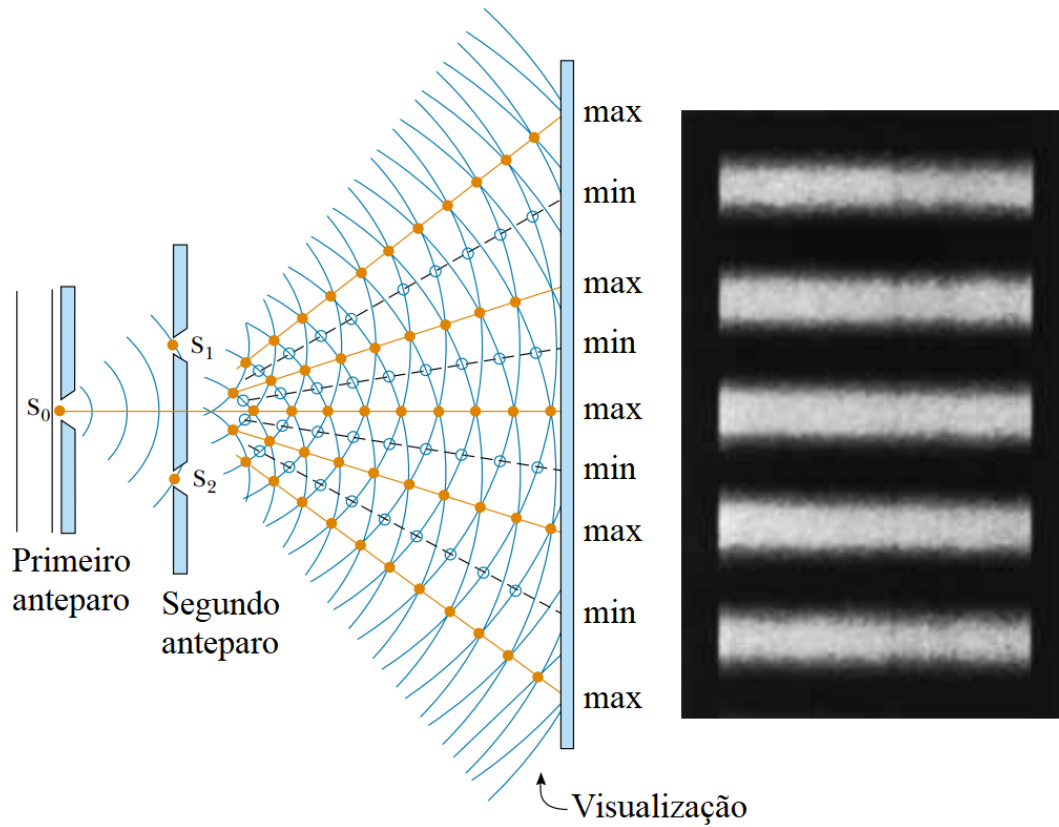
obstáculos com dimensões próximas ao seu comprimento de onda (ROCHA, 2002).

Fresnel combinou o princípio de Huygens com o conceito de interferência, modificando o princípio original para incluir as amplitudes relativas e as fases das ondas secundárias. Ao fazer isso, foi capaz de calcular as figuras de difração com grande precisão, o que representou um avanço significativo no entendimento da natureza ondulatória da luz. A partir de seus estudos, ficou claro que a luz não se propaga apenas em linha reta, mas também sofre difração e interferência quando encontra obstáculos ou aberturas (NUSSENZVEIG, 2002).

É importante ressaltar que, embora Huygens já tivesse realizado experimentos sobre os “anéis de Newton” em 1665, ele não analisou em seu livro os efeitos luminosos que hoje são considerados tipicamente ondulatórios como a interferência e a difração. Além disso, ao estudar a dupla refração, Huygens não descobriu a existência da polarização. A compreensão desses fenômenos e sua associação com a natureza ondulatória da luz foi resultado dos trabalhos de Young e Fresnel (MARTINS; SILVA, 2015).

A importância dos estudos de Young e Fresnel reside no fato de que eles forneceram uma base experimental e teórica sólida para a teoria ondulatória da luz, demonstrando que fenômenos como a interferência e a difração não podiam ser explicados pela teoria corpuscular de Newton. Os experimentos de Young com a dupla fenda e as análises matemáticas de Fresnel sobre a difração foram cruciais para que a teoria ondulatória ganhasse aceitação na comunidade científica (SILVA, 2009). O experimento de dupla fenda de Young é representado na figura 6.

Figura 6 – Representação do Experimento da dupla fenda de Young, mostrando a luz passando pela primeira abertura S_0 se difratando e passando por mais duas aberturas S_1 e S_2 no segundo anteparo. Os dois feixes emergentes difratam e se interferem formando uma padrão de franjas claras e escuras no terceiro anteparo.



Fonte: Figura adaptada de Halliday e Resnick (2007, p. 1187).

5 Confirmação do comportamento ondulatório da luz por Maxwell

A confirmação do comportamento ondulatório da luz por Maxwell ocorreu ao longo do século XIX, uma época marcada por grandes avanços nas teorias e descobertas sobre eletromagnetismo e óptica. Até então, a natureza da luz era um tema amplamente debatido, com teorias corpusculares e ondulatórias competindo entre si. A síntese realizada por Maxwell, ao estabelecer que a luz é uma onda eletromagnética, representou um marco crucial na compreensão da luz, unificando as ideias sobre eletromagnetismo e óptica em um único referencial teórico (ROCHA, 2002).

Conforme discutido, acreditava-se que a luz se propagava através do éter, assim como as ondas sonoras se propagam através do ar. No entanto, a natureza desse meio era um mistério e as tentativas de descrevê-lo mecanicamente enfrentavam diversas dificuldades. Maxwell, ao propor sua teoria eletromagnética, conseguiu associar as propriedades desse éter com as propriedades dos campos elétrico e magnético, sem a necessidade de um modelo puramente mecânico (ROCHA, 2002).

As descobertas de Faraday sobre indução eletromagnética foram importantes para o trabalho de Maxwell. Faraday demonstrou que um campo magnético variável poderia gerar um campo elétrico e vice-versa. Maxwell percebeu que esses fenômenos poderiam ser descritos por meio de um conjunto de equações que unificariam eletricidade e magnetismo. Ele também propôs o conceito de corrente de deslocamento, que permitiu que suas equações descrevessem a propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre (LIMA, 2019).

A confirmação do comportamento ondulatório da luz na teoria de Maxwell veio da relação entre a velocidade das ondas eletromagnéticas e a velocidade da luz. Ao derivar a velocidade das ondas a partir de suas equações, Maxwell descobriu que essa velocidade era aproximadamente igual à velocidade da luz medida experimentalmente. Essa coincidência levou Maxwell à conclusão de que a luz era uma onda eletromagnética, marcando a unificação da óptica e do eletromagnetismo e eliminando a necessidade de dois éteres distintos, um para a luz e outro para os fenômenos eletromagnéticos (ROCHA, 2002).

As equações de Maxwell não foram inicialmente aceitas por todos. Alguns físicos da época estavam ligados a uma visão mais mecanicista do mundo, em que todos os fenômenos deveriam ser explicados em termos de forças de contato e movimento de partículas. No entanto, experimentos conduzidos posteriormente por Hertz confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas, solidificando a teoria de Maxwell. Hertz gerou ondas eletromagnéticas em laboratório e demonstrou que elas se propagavam com a velocidade da luz, confirmando as previsões teóricas de Maxwell (NUSSENZVEIG, 2002).

5.1 Definição, evidências e implicações

Maxwell chegou às suas quatro equações do eletromagnetismo através de um processo que envolveu a unificação de conceitos existentes, a introdução de novas ideias e a manipulação de equações já estabelecidas. Ele se baseou nos estudos experimentais de Michael Faraday, que demonstrou a conexão entre eletricidade e magnetismo, e também nas leis de Ampère e Gauss, que tratavam esses fenômenos de forma separada (SIQUEIRA, 2021).

A primeira equação de Maxwell é a Lei de Gauss para a Eletricidade, que afirma que o fluxo do campo elétrico \vec{E} através de uma superfície fechada é proporcional à densidade de carga elétrica ρ no interior dessa superfície, ou seja,

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (5.1)$$

sendo $\varepsilon_0 = 8,8541878188(14) \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ a *permissividade elétrica do vácuo* (NIST, 2025). Essa lei relaciona o campo elétrico com suas fontes, as cargas elétricas, e descreve como estas geram um campo elétrico no espaço ao redor delas (PASSOS; OLIVEIRA; GOMES, 2019). A lei de Gauss é uma generalização da lei de Coulomb para distribuições de cargas arbitrárias.

A segunda equação, conhecida como Lei de Gauss para o magnetismo, estabelece que o fluxo do campo magnético \vec{B} através de qualquer superfície fechada é sempre igual a zero. Essa lei reflete a inexistência de monopólos magnéticos, ou seja, não existem fontes magnéticas isoladas, assim como as cargas elétricas, e as linhas de campo magnético formam sempre circuitos fechados (SIQUEIRA, 2021). Essa lei pode ser expressa como:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (5.2)$$

A terceira equação é a Lei de Faraday-Lenz, que descreve como um campo magnético variável induz um campo elétrico. Essa lei afirma que a variação temporal do fluxo magnético através de um circuito fechado gera uma força eletromotriz induzida, que por sua vez cria um campo elétrico. A lei de Lenz adiciona que a polaridade do campo elétrico induzido é tal que ele se opõe à variação do fluxo magnético que o originou, expressando o princípio de conservação de energia (SIQUEIRA, 2021). Esta lei é expressa pelo rotacional do campo elétrico, ou seja,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (5.3)$$

O sinal negativo indica que a variação do campo magnético no tempo gera um campo elétrico induzido em sentido oposto.

A quarta equação é a Lei de Ampère-Maxwell. Para obtenção da mesma, Maxwell percebeu que havia uma assimetria nas equações existentes do eletromagnetismo. Além das três equações já apresentadas, existia a seguinte equação,

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}, \quad (5.4)$$

em que $\mu_0 = 1,25663706127(20) \times 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$ é a *permeabilidade magnética do vácuo* (NIST, 2025) e \vec{j} é a densidade de corrente, dada pela corrente elétrica I fluindo através de um elemento de área $d\vec{S}$, ou seja, $dI = \vec{j} \cdot d\vec{S}$. A equação (5.4) foi obtida por Maxwell a partir da lei circuital de Ampère.

De acordo com as quatro equações apresentadas, campos magnéticos variando no tempo podem induzir campos elétricos, como mostrado pela equação (5.3), mas aparentemente campos elétricos não podem afetar campos magnéticos.

Para corrigir essa assimetria, Maxwell adicionou o termo $\mu_0 \varepsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t$, conhecido como densidade de corrente de deslocamento, do lado direito da equação (5.4) para tornar as suas equações matematicamente auto-consistentes, uma vez que este termo garantia a indução de campos magnéticos a partir de campos elétricos variando no tempo. Dessa forma, a quarta equação de Maxwell é descrita por:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right), \quad (5.5)$$

conhecida como Lei de Ampère-Maxwell.

Maxwell percebeu que suas equações possuíam soluções do tipo onda, capazes de se propagar em qualquer meio, inclusive no vácuo. Ao calcular a velocidade dessas ondas

eletromagnéticas, ele descobriu que o valor obtido coincidia com a velocidade da luz, que já era conhecida na época por meio de medições experimentais (ROCHA, 2002). Essa descoberta foi crucial para consolidar a ideia de que a luz é uma onda eletromagnética, unificando os fenômenos ópticos e eletromagnéticos em um mesmo formalismo teórico. A seguir, vamos demonstrar esse cálculo, partindo das equações de Maxwell para chegar à equação de onda e determinar matematicamente o valor da velocidade da luz no vácuo.

Vamos considerar as equações de Maxwell no vácuo, onde não há cargas elétricas $\rho = 0$ e nem correntes $\vec{j} = 0$. A partir dessas considerações as equações (5.1) e (5.5) tornam-se:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0. \quad (5.6)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (5.7)$$

Aplicando o operador rotacional ($\nabla \times$) na equação (5.3) e utilizando a equação (5.7), tem-se:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}). \quad (5.8)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}). \quad (5.9)$$

Utilizando a identidade,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}. \quad (5.10)$$

e considerando as equações (5.6) e (5.9), obtém-se:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (5.11)$$

Se considerarmos as equações de Maxwell para o campo magnético \vec{B} obteremos a mesma equação de onda, bastando trocar \vec{E} por \vec{B} .

A forma da equação de onda (5.11), além de nos dizer que o campo elétrico é uma onda, ela fornece a velocidade de propagação v dessa onda, pois a forma geral da equação de onda é dada por:

$$\nabla^2 \vec{A} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2}. \quad (5.12)$$

Comparando as equações (5.11) e (5.12), tem-se para o campo elétrico que:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v^2} &= \mu_0 \epsilon_0, \\ \therefore v &= \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Considerando os valores de ε_0 e μ_0 tem-se que $v = 2,99792458 \times 10^8$ m/s, ou seja, a velocidade de propagação da onda é a velocidade da luz no vácuo c , confirmando a hipótese de Maxwell de que a luz é uma onda eletromagnética.

A teoria de Maxwell revolucionou a compreensão da natureza da luz, unificando os fenômenos ópticos e eletromagnéticos. Além de demonstrar que a luz é uma onda, ele revelou que se trata de uma onda eletromagnética, composta por campos elétrico e magnético oscilantes e perpendiculares entre si. Um dos aspectos mais impactantes dessa teoria foi a conclusão de que a luz pode se propagar no vácuo, sem a necessidade de um meio material, como o éter, cuja existência era amplamente aceita na época. As equações de Maxwell permanecem fundamentais até os dias de hoje, sendo essenciais para a compreensão do eletromagnetismo e suas inúmeras aplicações, desde a transmissão de sinais de rádio e telecomunicações até o desenvolvimento de tecnologias avançadas como radares, redes elétricas e dispositivos ópticos (PASSOS; OLIVEIRA; GOMES, 2019).

A confirmação do comportamento ondulatório da luz, a partir das equações de Maxwell, representou um marco no desenvolvimento da Física, superando a dicotomia entre as teorias corpusculares e ondulatórias, e abrindo caminho para o desenvolvimento da física moderna (SILVA, 2008).

A teoria eletromagnética da luz proposta por Maxwell em 1861, apesar de inovadora, para a época, carecia de confirmação experimental. As equações de Maxwell previam a existência de ondas eletromagnéticas, mas na época não havia tecnologia para gerar ou detectar tais ondas. Essa confirmação só veio em 1886, com os experimentos de Heinrich Hertz (NUSENZVEIG, 2002).

Inspirado pela teoria de Maxwell, o físico alemão Heinrich Hertz obteve, em 1887, a confirmação experimental da existência das ondas eletromagnéticas ao produzi-las por meios puramente elétricos. Para isso, ele construiu um circuito oscilante de pequenas dimensões, capaz de gerar ondas com comprimento de onda de aproximadamente 0,3 metros, hoje conhecidas como ondas hertzianas ou ondas de rádio. A detecção dessas ondas era realizada pela observação de faíscas em um pequeno espaço entre os eletrodos do circuito receptor. Assim, Hertz demonstrou que as ondas eletromagnéticas se propagavam com a mesma velocidade da luz, confirmando a previsão teórica de Maxwell (ROCHA, 2002; NUSENZVEIG, 2002).

Além de produzir e detectar essas ondas, Hertz verificou que elas exibiam propriedades características dos fenômenos ondulatórios, como reflexão, refração, difração e polarização, evidenciando sua semelhança com a luz visível. Ele também observou que essas ondas podiam interferir umas com as outras, reforçando a ideia de sua natureza ondulatória. Esses experimentos forneceram uma forte evidência para a teoria eletromagnética de Maxwell, demonstrando que as ondas eletromagnéticas e a luz compartilhavam as mesmas propriedades fundamentais (ROCHA, 2002).

Os resultados de Hertz foram decisivos para a aceitação da teoria de Maxwell como uma descrição precisa dos fenômenos eletromagnéticos. Se a luz e as ondas eletromagnéticas possuíam a mesma velocidade e comportamentos semelhantes, sua identidade se tornava altamente provável. Dessa forma, a óptica foi unificada com o estudo da eletricidade e do magnetismo, estabelecendo um marco fundamental na compreensão da luz como uma manifestação do eletromagnetismo (NUSSENZVEIG, 2002).

As equações de Maxwell também permitiram prever a existência de outras formas de radiação eletromagnética, além da luz visível. A descoberta das ondas de rádio por Hertz confirmou essa previsão e inaugurou uma nova era na tecnologia das comunicações. A unificação de eletricidade, magnetismo e óptica, revelou que essas eram diferentes manifestações de um mesmo fenômeno. Maxwell não só mostrou que a luz era uma onda eletromagnética, mas também que o espectro eletromagnético era muito mais amplo do que se imaginava, abrangendo desde as ondas de rádio até os raios gama (PASSOS; OLIVEIRA; GOMES, 2019).

Estes resultados também trouxeram uma nova perspectiva para o entendimento de fenômenos como a difração e a interferência. As equações de Maxwell forneceram uma base sólida para a compreensão dos mesmos através da propagação das ondas eletromagnéticas. A teoria de Maxwell também forneceu uma explicação para a polarização da luz, demonstrando que as ondas eletromagnéticas são transversais e não longitudinais (NUSSENZVEIG, 2002).

Além de seu impacto na compreensão da natureza da luz, a teoria de Maxwell teve um papel fundamental no desenvolvimento da física moderna. As equações de Maxwell mostraram que a velocidade da luz no vácuo é uma constante universal, um postulado fundamental na relatividade especial de Einstein, que surgiu da necessidade de compatibilizar

a eletrodinâmica de Maxwell com o princípio da relatividade (LIMA, 2019).

5.2 Limitações

A confirmação do que poderia ser a natureza ondulatória da luz por Maxwell, embora revolucionária, também trouxe novos desafios para a Física. Sua teoria, ao unificar eletricidade, magnetismo e óptica, representou um grande avanço, mas deixou algumas questões em aberto, especialmente no que diz respeito à interação da luz com a matéria em nível atômico. Um dos principais problemas era a dificuldade de conciliar a teoria clássica do eletromagnetismo com a estrutura atômica da matéria, o que se tornou evidente em fenômenos que só começaram a ser melhor compreendidos no século XX, desafiando a visão puramente ondulatória da luz (ROCHA, 2002).

A teoria de Maxwell, por ser clássica, também enfrentava limitações ao tentar explicar o espectro de emissão de corpos negros. A radiação de um corpo negro, que descreve a emissão de luz por um corpo aquecido, não era corretamente explicada pela física clássica. As previsões teóricas levavam à chamada “catástrofe do ultravioleta”, segundo a qual a emissão de energia deveria crescer indefinidamente em altas frequências, um resultado que contrariava os dados experimentais. Esse problema permaneceu sem solução até que Max Planck, no início do século XX, propôs a quantização da energia, demonstrando que a energia da radiação não era emitida por um corpo negro de forma contínua, mas sim em pacotes discretos de energia chamados de *quanta*. Essa teoria abriu caminho para uma revolução na compreensão da luz e da radiação térmica (ROCHA, 2002).

Outra limitação da teoria de Maxwell era sua incapacidade de explicar o efeito fotoelétrico, fenômeno no qual elétrons são emitidos de um material quando iluminado por luz. De acordo com as previsões da física clássica, a energia dos elétrons emitidos deveria depender apenas da intensidade da luz incidente. No entanto, os experimentos mostraram que a energia dos elétrons dependia exclusivamente da frequência da luz, contrariando as expectativas baseadas na teoria ondulatória. A explicação desse fenômeno veio apenas com Albert Einstein, que introduziu o conceito de fótons, que são *quanta* de luz com energia e momento bem definidos. Essa abordagem mostrou que a luz, além de seu caráter ondulatório, também apresentava um comportamento corpuscular, consolidando a dualidade onda-partícula e dando início à revolução da física quântica (ROCHA, 2002).

A polarização da luz, embora explicável em termos de ondas transversais, também apresentou desafios na interpretação de fenômenos como a dupla refração em certos materiais. O modelo inicial de Huygens, que descrevia a luz como um pulso não periódico, não abordava completamente a polarização, enquanto a explicação de Newton, baseada em sua teoria corpuscular, também se mostrou insuficiente. A compreensão mais abrangente da polarização da luz foi sendo aprimorada ao longo do tempo, com a formulação da teoria ondulatória de Fresnel e, posteriormente, com o desenvolvimento da eletrodinâmica de Maxwell. No entanto, apenas com o avanço da física quântica foi possível descrever completamente os fenômenos de polarização, especialmente em sistemas que envolvem a interação entre luz e matéria (MOURA, 2016).

Além disso, a teoria de Maxwell ainda dependia do conceito de éter para a propagação das ondas eletromagnéticas. Apesar de não precisar de um éter mecânico, o modelo ainda carecia de uma descrição mais precisa sobre o meio no qual as ondas se propagavam. A ideia de um éter foi eventualmente abandonada com o advento da teoria da relatividade especial de Einstein, que revolucionou as concepções de espaço e tempo, mostrando que a luz se propaga no vácuo sem a necessidade de um meio material (NUSSENZVEIG, 2002).

6 Ruptura com a Física Clássica e o surgimento da dualidade onda-partícula

Um dos princípios fundamentais da mecânica quântica é a dualidade onda-partícula, que estabelece que a luz pode se comportar tanto como uma onda quanto como uma partícula, dependendo do experimento realizado. Da mesma forma, partículas como o elétron também exibem esse comportamento dual, podendo apresentar propriedades associadas a ondas, como interferência e difração. Quando as leis formais da mecânica quântica foram formuladas, a quantidade central utilizada para descrever o estado de uma partícula passou a ser a função de onda. Essa função contém todas as informações sobre o sistema quântico e sua evolução no tempo, sendo essencial para calcular probabilidades de encontrar a partícula em determinadas regiões do espaço.

Nesta seção, apresentamos algumas das evidências experimentais que levaram ao desenvolvimento de uma teoria quântica da luz, na qual seu comportamento corpuscular foi reconsiderado. Esses resultados desafiaram a visão puramente ondulatória estabelecida no século XIX, trazendo de volta o debate sobre a natureza da luz e culminando na formulação de um novo paradigma na Física.

6.1 Explicação da Radiação de Corpo Negro por Planck

No final do século XIX, a comunidade científica confrontava um enigma persistente no estudo da radiação de corpo negro. As teorias clássicas da física, que englobavam a termodinâmica e o eletromagnetismo, se mostravam incapazes de prever com precisão a distribuição da energia irradiada por um corpo negro em todos os comprimentos de onda. As observações experimentais revelavam um comportamento da intensidade da radiação em função do comprimento de onda e da temperatura que desafiava as explicações clássicas, culminando no problema conhecido como a “catástrofe ultravioleta”. A teoria clássica previa uma intensidade de radiação que divergia para o infinito em comprimentos de onda curtos (ROCHA, 2002).

Em 1900, Max Planck propôs uma solução em que se viu obrigado a romper com

os pilares da física clássica. Em vez de considerar a energia radiante como um fluxo contínuo, ele introduziu a ideia de que a energia somente poderia ser emitida ou absorvida em pacotes discretos e indivisíveis, que ele denominou como *quanta* de energia. Essa hipótese fundamental sugeria que a energia de cada *quantum* era diretamente proporcional à frequência da radiação, estabelecendo uma relação quantizada através de uma nova constante fundamental da natureza, a constante de Planck $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ JHz}^{-1}$ (ROCHA, 2002).

Matematicamente, Planck formalizou a energia E de cada *quantum* de radiação eletromagnética com uma dada frequência f , pela célebre equação:

$$E = hf, \tag{6.1}$$

Ao introduzir a quantização da energia, Planck conseguiu derivar uma fórmula matemática que se ajustava de maneira satisfatória aos dados experimentais da radiação de corpo negro para todo o espectro de comprimentos de onda. Essa formulação, que ficou conhecida como a lei de Planck da radiação do corpo negro, descrevia a distribuição espectral da energia emitida em função da frequência (ou comprimento de onda) e da temperatura do corpo negro (ROCHA, 2002).

A inovadora hipótese de Planck e a sua lei da radiação ofereceram uma solução elegante para a “catástrofe do ultravioleta”. A quantização da energia impunha uma restrição fundamental sobre as energias possíveis para os osciladores responsáveis pela emissão da radiação. Para frequências muito elevadas, correspondentes a comprimentos de onda muito curtos, a energia hf de um único *quantum* tornava-se tão grande que a probabilidade de os osciladores possuírem energia suficiente para emitir radiação nessas frequências se tornava extremamente baixa, resultando em uma intensidade de radiação que tendia a zero, em perfeita consonância com as observações experimentais (ROCHA, 2002).

Apesar do sucesso empírico de sua formulação, Planck inicialmente encarava sua hipótese de quantização mais como um artifício matemático para reproduzir os dados experimentais, mostrando-se hesitante em aceitar as profundas implicações que essa ideia trazia para a compreensão da natureza da energia e da luz. Contudo, a notável concordância da sua lei com os experimentos e o posterior sucesso da ideia de quantização no trabalho de Albert Einstein sobre o efeito fotoelétrico solidificaram a teoria de Planck, marcando o

nascimento da mecânica quântica e revolucionando a física ao introduzir a fundamental noção de quantização da energia e da luz (ROCHA, 2002).

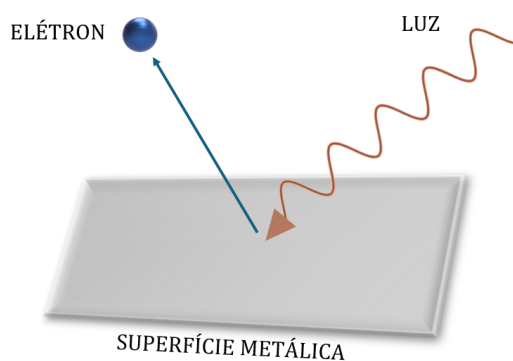
6.2 Descrição Corpuscular da luz por Einstein

O comportamento corpuscular da luz é reconsiderado no início do século XX por Albert Einstein em seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico publicado em 1905, intitulado “*Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*” (“Um ponto de vista heurístico sobre a produção e transformação da luz”) (EINSTEIN, 1905). Para explicar como elétrons são ejetados de um metal quando luz incide no mesmo, Einstein utilizou a hipótese dos *quanta* de energia de Planck, fornecendo uma explicação precisa para o fenômeno (NUSSENZVEIG, 2002).

6.2.1 Definição, evidências e implicações

O efeito fotoelétrico é o fenômeno em que um material, geralmente metálico, emite elétrons ao ser irradiado por luz ou outra radiação eletromagnética, conforme ilustrado na figura 7 (SIQUEIRA, 2021).

Figura 7 – Representação do Efeito Fotoelétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo utilizado para entender este fenômeno considera que os elétrons são partes constituintes do átomo e se energia suficiente fosse fornecida aos mesmos, correspondente à função trabalho W_0 do material, estes elétrons, chamados de fotoelétrons, poderiam ser ejetados do metal com uma energia cinética E_c (ROCHA, 2002). De acordo com o princípio da conservação de energia, a energia cinética E_c dos fotoelétrons ejetados seria dada pela

diferença entre a energia da radiação incidente E e a função trabalho do material, ou seja,

$$E_c = E - W_0. \quad (6.2)$$

Foi observado experimentalmente que, abaixo de uma certa frequência crítica f_c nenhum fotoelétron era ejetado, por mais intensa que fosse a luz incidente. Essa frequência crítica depende do metal e foi chamada de *frequência de corte* f_c ou *limiar* (ROCHA, 2002).

Adicionalmente, foi observado que, se a frequência do feixe incidente for aumentada, a energia cinética máxima dos fotoelétrons ejetados também aumenta, independentemente de a intensidade do feixe incidente ser mantida fixa. De maneira complementar, quando a intensidade da luz incidente com uma determinada frequência é aumentada, a energia cinética de cada fotoelétron permanece constante. Outro efeito observado foi que a emissão de fotoelétrons ocorre quase que instantaneamente após a luz incidir no metal, mesmo que o feixe incidente tenha uma intensidade muito baixa.

Todas essas observações eram surpreendentes e não podiam ser explicadas com base nas leis clássicas da Física conhecidas no final do século XIX.

Para a explicação do efeito fotoelétrico, Einstein considera a hipótese de quantização de Planck, assumindo que a luz era composta de *quanta*, chamados fótons, cada um transportando uma quantidade de energia proporcional à frequência f da luz, ou seja, $E = hf$.

Dessa forma, quando um desses fótons penetra no metal, ele fornece toda a sua energia para o elétron. Se a energia hf é maior que a função trabalho W_0 do metal, o elétron é ejetado com energia cinética E_c . Pela equação (6.2) tem-se que:

$$hf = E_c + W_0. \quad (6.3)$$

A equação (6.3) explica todas as características observadas do efeito fotoelétrico. Se $hf > W_0$, um elétron é ejetado com energia cinética $E_c = hf - W_0$. Caso $hf \leq W_0$, não há ejeção de elétrons, pois o fóton não tem energia suficiente para isso. Isso explica porque nenhum fotoelétron é ejetado para luz incidente com uma frequência abaixo do valor crítico $f_c = W_0/h$, independentemente do quão intensa seja a luz.

O número de elétrons emitidos no efeito fotoelétrico é proporcional à intensidade da luz incidente, desde que a frequência da luz seja superior ao limiar f_c . Cada fóton incidente

interage individualmente com um elétron do metal, e a intensidade da luz, relacionada ao número de fótons, define a quantidade de elétrons emitidos no efeito fotoelétrico (ROCHA, 2002).

O efeito fotoelétrico possui diversas aplicações práticas, como em células fotoelétricas, detectores de luz, fotomultiplicadoras e em sistemas de energia solar fotovoltaica, onde a luz solar, ao incidir sobre um material semicondutor, libera elétrons, gerando corrente elétrica (SIQUEIRA, 2021).

O físico americano Robert Millikan, inicialmente cético em relação à explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico, dedicou uma década (1905-1915) a experimentos meticulosos com o objetivo de refutar a teoria de Einstein. No entanto, seus resultados experimentais confirmaram plenamente a predição de Einstein, levando-o a admitir a validade da teoria, mesmo que parecesse “violiar tudo o que conhecíamos sobre a interferência da luz” (NUSSENZVEIG, 2002).

A confirmação da teoria de Einstein para explicar o efeito fotoelétrico levou a uma nova compreensão do comportamento da luz, na qual a energia deixou de ser vista como algo contínuo e passou a ser considerada quantizada. A concepção da luz como composta por fótons, dotados de propriedades corpusculares, foi essencial para o desenvolvimento de diversas tecnologias, como lasers e células solares, que dependem da interação da luz com a matéria em nível atômico (PASSOS; OLIVEIRA; GOMES, 2019).

A descrição corpuscular da luz proposta por Einstein teve um impacto profundo na Física, especialmente no desenvolvimento da física quântica e na compreensão da dualidade onda-partícula. A teoria de Einstein forneceu uma explicação satisfatória para o efeito fotoelétrico, que a física clássica, baseada na descrição ondulatória da luz, não conseguia explicar. Essa explicação abriu caminho para uma nova compreensão da natureza da luz e da matéria (NUSSENZVEIG, 2002).

6.2.2 Limitações

Apesar do sucesso da descrição corpuscular da luz de Einstein em explicar o efeito fotoelétrico, essa descrição, por si só, apresentava limitações na explicação de outros fenômenos ópticos, como a difração e a interferência, os quais eram explicados de forma mais adequada pela teoria ondulatória da luz. Essa aparente contradição, em que a luz

se comportava como partícula em alguns experimentos e como onda em outros, levou à necessidade de se desenvolver uma nova teoria que unificasse esses dois aspectos da luz (NUSSENZVEIG, 2002).

A solução para essa aparente dicotomia veio com o desenvolvimento da física quântica, que propôs que a luz possui um comportamento dual, conhecido como dualidade onda-partícula, ou seja, a luz pode se comportar como onda ou como partícula, dependendo do tipo de experimento e da forma como a observamos. A partir do formalismo da física quântica, foi possível descrever a luz como uma entidade que exhibe características tanto ondulatórias quanto corpusculares, reconciliando as descrições aparentemente conflitantes da luz (NUSSENZVEIG, 2002).

6.3 O que é a dualidade onda-partícula?

A dualidade onda-partícula da luz é um conceito fundamental na física que descreve o comportamento e não a natureza da luz, como possuindo características tanto de ondas quanto de partículas, dependendo do experimento realizado. Essa dualidade não significa que a luz seja simultaneamente onda e partícula, mas sim que ela pode se manifestar de ambas as formas sob diferentes condições experimentais. A maneira como observamos o experimento, ou seja, o tipo de medição que escolhemos realizar, determina qual aspecto (onda ou partícula) será revelado (ROCHA, 2002).

O experimento da dupla fenda, realizado inicialmente por Thomas Young, é um marco na Física, pois demonstrou o comportamento ondulatório da luz e, mais tarde, contribuiu para a compreensão da dualidade onda-partícula da matéria. Como discutido anteriormente, ao incidir um feixe de luz sobre duas fendas estreitas, forma-se, em um anteparo, um padrão de interferência caracterizado por faixas alternadas de regiões claras e escuras. Esse fenômeno evidencia a natureza ondulatória da luz: as franjas claras surgem nas regiões onde as ondas se encontram em fase e se reforçam, enquanto as franjas escuras resultam da superposição de ondas em oposição de fase, causando seu cancelamento (LIMA, 2019).

No entanto, se, em vez de observarmos o padrão de interferência, medirmos por qual fenda cada fóton passou, o padrão de interferência desaparece, e a luz passa a se comportar como um fluxo de partículas. Isso evidencia que o próprio ato da medição influencia o resultado, determinando se o comportamento observado será ondulatório ou corpuscular (PASSOS; OLIVEIRA; GOMES, 2019).

A escolha do experimento influencia o resultado observado. Se o experimento é projetado para medir o comportamento ondulatório, como a distribuição da luz em um padrão de interferência, então a luz se manifesta como uma onda. Se o experimento é projetado para medir o comportamento corpuscular, como a energia ou o momento de fótons individuais, então a luz se manifesta como uma partícula. Essa mudança na manifestação não é uma mudança na natureza intrínseca da luz, mas uma consequência da interação entre o sistema quântico e o aparato de medição (NUSSENZVEIG, 2002).

A dualidade onda-partícula não é uma limitação da nossa capacidade de medição, mas sim uma propriedade fundamental da natureza. A física clássica, que trata de partículas

e ondas como entidades separadas e distintas, não consegue descrever esses fenômenos, pois a dualidade onda-partícula é inerente à mecânica quântica. A interpretação de Copenhague da mecânica quântica reconhece essa dualidade como uma característica essencial da realidade quântica, onde o ato de medir influencia o resultado (LIMA, 2019).

A dualidade onda-partícula também se aplica à matéria, e não apenas à luz. Elétrons, prótons e outras partículas subatômicas também exibem propriedades ondulatórias em alguns experimentos, como a difração de elétrons por um cristal, e propriedades corpusculares em outros. Essa dualidade é universal, sendo uma característica fundamental da realidade quântica. Portanto, o comportamento de uma entidade quântica é determinado pela forma como ela é observada e a interação entre o sistema quântico e o aparato de medição desempenha um papel crucial (SILVA, 2007).

Esse comportamento dual da matéria também é observado no experimento da dupla fenda, tendo em vista que foi constatado que não apenas a luz, mas também partículas como elétrons, ao passarem pelas fendas, exibem padrões de interferência, indicando que elas também possuem um caráter ondulatório. Essa descoberta levou ao conceito de dualidade onda-partícula, que estabelece que a luz e a matéria apresentam tanto propriedades de onda quanto de partícula (PASSOS; OLIVEIRA; GOMES, 2019).

A equação de Schrödinger traz a essência da dualidade onda-partícula. A partir de uma função de onda para uma onda plana, é possível obter uma equação de onda que leva em conta as ondas de matéria de de Broglie.

A equação de Schrödinger é fundamental na mecânica quântica, pois ela descreve a evolução temporal do estado quântico de um sistema físico. Em uma dimensão esta equação é dada por:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(x, t) \right) \psi(x, t), \quad (6.4)$$

em que $\psi(x, t)$ é a função de onda do sistema, $\hbar = h/2\pi$ é a constante de Planck reduzida, m é a massa da partícula, ∇^2 é o operador laplaciano que representa a soma das segundas derivadas espaciais e $V(x, t)$ é o potencial que atua sobre a partícula.

Para derivar a equação de Schrödinger a partir da função de onda de uma onda plana e utilizando as relações de Einstein e de Broglie, vamos considerar uma partícula livre ($V = 0$). A função de onda para uma onda plana com frequência ω e número de onda

k se propagando na direção- x pode ser escrita como em (2.9) para $\varphi = 0$, ou seja,

$$\psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)}. \quad (6.5)$$

De acordo com o postulado de de Broglie, o momento de uma partícula é descrito em termos do comprimento de onda de de Broglie λ e o seu correspondente número de onda k da seguinte forma:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k. \quad (6.6)$$

A energia cinética E está relacionada com o momento p da partícula através da relação clássica $E = p^2/2m$. Contudo, Einstein mostrou que a energia pode estar relacionada com a frequência ω através da relação $E = \hbar\omega$. Portanto, a dualidade onda-partícula implica que:

$$\begin{aligned} \hbar\omega &= \frac{p^2}{2m}, \\ \hbar\omega &= \frac{\hbar^2 k^2}{2m}, \\ \therefore \omega &= \frac{\hbar k^2}{2m}, \end{aligned} \quad (6.7)$$

em que utilizamos a relação (6.6).

Derivando a função de onda $\psi(x, t)$ no espaço e no tempo, obtém-se:

$$\frac{\partial\psi}{\partial t} = -i\omega\psi \quad \rightarrow \quad \psi = \frac{i}{\omega} \frac{\partial\psi}{\partial t}, \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = -k^2\psi \quad \rightarrow \quad \psi = -\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}. \quad (6.9)$$

Igualando as equações (6.8) e (6.9) e utilizando a equação (6.7) tem-se:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = i\hbar \frac{\partial\psi}{\partial t}. \quad (6.10)$$

Esta é a equação de Schrödinger para uma partícula livre, como um elétron, se movendo ao longo do eixo- x . Ela incorpora a dualidade onda-partícula, relacionando propriedades ondulatórias, através da função de onda ψ , e propriedades corpusculares, através do momento p e da energia E .

7 Possibilidades sobre o Ensino da Dualidade Onda-Partícula no Nível Médio

A introdução de tópicos de física contemporânea, como a dualidade onda-partícula, no ensino básico é viável e importante para modernizar o currículo e despertar o interesse dos alunos pela ciência. Tradicionalmente, o ensino de física no nível básico tem se concentrado em conceitos clássicos, como a queda de esferas, a reflexão em espelhos e a dispersão da luz em prismas. Embora esses tópicos sejam fundamentais para a construção de um raciocínio científico, é necessário expandir o horizonte dos estudantes, apresentando-lhes os desafios e as questões em aberto da ciência atual.

A dualidade onda-partícula, por exemplo, ainda é objeto de debates e investigações na comunidade científica. A natureza dos fótons e elétrons permanece como um tema de pesquisa ativa, com diversos estudos analisando suas propriedades e comportamentos fundamentais. Esses trabalhos não apenas aprofundam a compreensão desses fenômenos, mas também impulsionam novas perspectivas e avanços na física contemporânea.

Por exemplo, o artigo “Sobre a necessidade do conceito de fóton” (CARUSO; OGURI, 2021) investiga abordagens alternativas para a explicação dos efeitos fotoelétrico e Compton sem a necessidade do conceito tradicional de fóton. O estudo sugere que a compreensão da radiação eletromagnética pode ser mais complexa do que se supunha inicialmente, abrindo espaço para novas interpretações e debates no campo da física.

Outro estudo, “Uma nova luz sobre o conceito de fóton: Para além de imagens esquizofrênicas” (SILVA, 2015), investiga o desenvolvimento do conceito de fóton na segunda metade do século XX, destacando experimentos que evidenciam a natureza quântica da luz e propondo uma visão mais sofisticada dessa partícula.

Além disso, pesquisadores brasileiros publicaram um artigo (SARAIVA et al., 2017) demonstrando que fótons podem se comportar de maneira semelhante a elétrons ao atravessarem meios transparentes, formando pares e exibindo comportamentos análogos aos de elétrons em materiais que conduzem eletricidade sem dissipar energia através de calor.

Para incluir esse tema no ensino básico, é essencial um planejamento didático estruturado. Uma abordagem eficaz pode, a princípio, ser feita começando com a revisão dos conceitos clássicos de onda e partícula utilizando exemplos e experimentos acessíveis ao cotidiano dos alunos. Em seguida, a dualidade onda-partícula pode ser introduzida gradualmente, destacando como a luz e outras partículas manifestam comportamentos distintos conforme o tipo de experimento realizado. Essa progressão pode facilitar a compreensão e permitir que os estudantes estabeleçam conexões entre os modelos clássicos e a mecânica quântica.

O uso de recursos multimídia e experimentos práticos pode tornar as aulas mais envolventes e didaticamente eficazes. Atividades experimentais, como a observação de padrões de difração e interferência da luz utilizando lâminas de vidro e lasers acessíveis, permitem que os alunos compreendam conceitos abstratos de forma mais intuitiva. Além disso, simulações computacionais podem complementar essas atividades, oferecendo uma visualização interativa de fenômenos quânticos que não são facilmente reproduzidos em sala de aula, ampliando a compreensão dos estudantes sobre a dualidade onda-partícula.

Por exemplo, o artigo “Uso de simulações: Um estudo sobre potencialidades e desafios apresentados pelas pesquisas da área de ensino de física” (JAIME; LEONEL, 2024) explora como as simulações computacionais podem enriquecer a compreensão dos estudantes sobre fenômenos físicos, tornando o aprendizado mais envolvente e estimulante. Os autores destacam que, quando integradas de maneira eficaz ao currículo, essas ferramentas têm o poder de criar experiências interativas que tornam a aprendizagem de conceitos abstratos mais acessível, despertando a curiosidade e o interesse dos alunos.

Estudos têm demonstrado que a introdução de tópicos de física moderna e contemporânea no ensino básico pode não apenas aumentar o interesse dos alunos pela ciência, mas também aprimorar sua compreensão dos conceitos físicos. Um exemplo disso é o artigo “Por que inserir física moderna e contemporânea no ensino médio? Uma revisão das justificativas dos trabalhos acadêmicos” (SILVA; ARENGHI; LINO, 2013), em que os autores analisaram diversas pesquisas acadêmicas sobre a inserção desses tópicos no currículo do Ensino Médio. Eles concluíram que a inclusão de temas de física moderna e contemporânea pode proporcionar uma compreensão mais profunda da física, tornando o aprendizado mais relevante, interessante e motivador para os estudantes.

Além disso, é fundamental que os professores tenham uma formação complementar adequada para ensinar esses tópicos de forma eficaz e atualizada. Programas de desenvolvimento profissional e cursos de atualização são essenciais para fornecer aos educadores as ferramentas pedagógicas e o conhecimento especializado necessários para abordar a física contemporânea de maneira clara e acessível. Esses programas podem capacitar os docentes a ensinar conceitos complexos com confiança, estimulando o interesse dos alunos e contribuindo para uma melhor compreensão dos temas modernos da física.

Em resumo, a modernização do ensino de física no nível básico, incluindo a introdução de tópicos como a dualidade onda-partícula, é uma abordagem viável e necessária. Ao conectar os alunos com os problemas atuais da ciência e incentivá-los a pensar criticamente, podemos formar uma nova geração de cientistas e cidadãos mais informados.

8 Considerações Finais

As reflexões desenvolvidas neste trabalho proporcionaram uma compreensão mais ampla sobre as teorias e os experimentos conduzidos na tentativa de explicar a natureza e o comportamento da luz, destacando como as ideias evoluíram ao longo do tempo. Inicialmente, a luz foi entendida como partículas, conforme proposto por Newton, mas essa concepção não era capaz de explicar todos os fenômenos observados. A teoria ondulatória, apresentada por Huygens, trouxe uma nova perspectiva, explicando fenômenos como a refração e a difração. No entanto, essa abordagem também apresentava limitações.

Posteriormente, a confirmação do comportamento ondulatório da luz por Maxwell, com a unificação do eletromagnetismo e a descoberta de que a luz é uma onda eletromagnética, representou um marco importante na ciência. Ainda assim, a física clássica enfrentou dificuldades para explicar fenômenos como o efeito fotoelétrico, o que levou Einstein a reconsiderar uma descrição corpuscular da luz, propondo que ela é composta por fótons, pacotes de energia.

O principal avanço foi compreender que a luz não se comporta exclusivamente como onda ou partícula, mas como algo que apresenta ambas as características, dependendo da situação experimental. Esse conceito, conhecido como dualidade onda-partícula, tornou-se um dos fundamentos da física contemporânea.

No contexto do ensino básico, o tema da dualidade onda-partícula pode ser abordado de forma acessível, valorizando a evolução das ideias científicas e destacando as limitações de cada teoria ao longo do tempo. Em vez de apresentar a dualidade como um conceito complexo, é possível focar na jornada dos cientistas, mostrando como a observação de fenômenos e a formulação de novas teorias levaram à conclusão de que a luz e outras partículas exibem características tanto de ondas quanto de partículas. Para isso, algumas estratégias podem ser sugeridas.

Primeiramente, pode-se apresentar os conceitos de onda e partícula com exemplos do cotidiano, como ondas em um lago e bolas de bilhar, de forma que os estudantes compreendam a diferença entre esses conceitos na física clássica. Em seguida, é interessante abordar a evolução histórica das teorias sobre a natureza da luz, desde Newton até Einstein,

ênfatizando os pontos fortes e as limitações de cada modelo, além de evidenciar que a ciência é um processo contínuo de revisão e aperfeiçoamento de ideias.

Outro ponto relevante é a realização de experimentos que demonstrem o comportamento ondulatório e corpuscular da luz, como a difração e o efeito fotoelétrico. Também é fundamental discutir o conceito de dualidade onda-partícula, explicando que a luz não é exclusivamente onda ou partícula, mas exibe ambas as características de acordo com o contexto experimental. Por fim, explorar aplicações tecnológicas baseadas nesses conceitos, como lasers, células solares e equipamentos de comunicação, pode motivar os estudantes e demonstrar a relevância do tema no mundo atual.

Assim, uma abordagem pedagógica com base nessas sugestões pode proporcionar aos estudantes uma compreensão mais profunda do considerável esforço de muitos cientistas ao longo da história, que se dedicaram a entender a natureza e o comportamento da luz. Além disso, essa abordagem pode estimular uma percepção mais clara de como a ciência evolui por meio da experimentação, da observação e da formulação e revisão de teorias. Vale ressaltar, também, que a dualidade onda-partícula não é um conceito facilmente visualizado ou compreendido de maneira intuitiva. Trata-se de uma ideia que exige um estudo aprofundado, considerando os princípios da física clássica e da física quântica, e que, portanto, demanda uma atenção cuidadosa e uma base sólida de conhecimentos científicos.

Referências

- ARAÚJO, S. M.; SILVA, F. W. O. da. A teoria ondulatória de Huygens em livros didáticos para cursos superiores. *Ciência Educação*, Bauru, v. 15, n. 2, p. 323–341, 2009.
- CARUSO, F.; OGURI, V. Sobre a necessidade do conceito de fóton. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, 2021. Acesso em: fev. 2025. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/S9cfMvmNLHm9F4HrdTCCDrc/>>.
- DIAS, A. G. et al. Frente de onda. *Revista de Ciência Elementar*, Curitiba, v. 2, n. 4, p. 256, set. 2014.
- EINSTEIN, A. Über einen die erzeugung und verwandlung des lichte betreffenden heuristischen gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, Johann Ambrosius Barth, Leipzig, v. 17, n. 6, p. 132–148, 1905.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics*. Extended 8th edition. [S.l.]: Wiley, 2007.
- HUYGENS, C. *Traité de la Lumière*. Leiden: Pierre van der Aa, 1690.
- JAIME, D. M.; LEONEL, A. A. Uso de simulações: Um estudo sobre potencialidades e desafios apresentados pelas pesquisas da área de ensino de física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Sociedade Brasileira de Física, v. 46, p. e20230309, 2024. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0309>>.
- KRAPAS, S.; QUEIROZ, G. R. P. C.; UZÊDA, D. O tratado sobre a luz de Huygens: comentários. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 28, n. 1, p. 123–151, abr. 2011.
- LIMA, M. C. de. Sobre o surgimento das equações de Maxwell. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 41, n. 4, p. e20190079, 2019.
- MAIA, A. de A. *A equação da onda*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Matemática) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/4068>>. Acesso em: fev. 2025.
- MARTINS, R. de A.; SILVA, C. C. As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 4202, 2015.
- MOURA, B. A. Newton versus Huygens: como (não) ocorreu a disputa entre suas teorias para a luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 33, n. 1, p. 111–141, abr. 2016.
- NEWTON, I. *Quaestiones quaedam philosophicae*. 1664. Cambridge University Library, MS Add. 3996.
- NEWTON, I. *New Theory about Light and Colours*. 1672. A letter to the Royal Society.
- NEWTON, I. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Royal Society, 1687.

NEWTON, I. *Of Colours*. 1704. In: *Opticks: or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*. London: Royal Society.

NEWTON, I. *Opticks: or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*. London: Royal Society, 1704.

NIST. *Fundamental Physical Constants*. 2025. Acesso em: fev. 2025. Disponível em: <<https://pml.nist.gov/cuu/Constants/>>.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: ótica, relatividade e física quântica, Volume 4*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2002.

PASSOS, M. N. S.; OLIVEIRA, A. M. de; GOMES, A. K. F. Aplicações das equações de maxwell. *Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologias*, IFSP – Campus Cubatão, v. 4, n. 4, p. 260, fev./jul. 2019.

PIUBELLI, S. L. et al. Simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos para o ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Campo Grande, v. 32, n. 1, p. 1301, 2010.

ROCHA, J. F. M. *Origens e evolução das idéias da física*. Salvador: EDUFBA, 2002.

SARAIVA, A. et al. Photonic counterparts of cooper pairs. *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, v. 119, p. 193603, Nov 2017. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.119.193603>>.

SILVA, B. V. da C. A popularização na ciência: A óptica de newton no século xviii. *Holos*, Natal, v. 24, n. 3, p. 95–104, 2008.

SILVA, F. W. da. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 149–159, 2007.

SILVA, F. W. da. A teoria da luz de newton nos textos de young. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 1601, 2009.

SILVA, I. Uma nova luz sobre o conceito de fóton: Para além de imagens esquizofrênicas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 37, n. 4, p. 4204–1–4204–11, out. 2015. Acesso em: fev. 2025. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/smz83BybLjppJbB8hncSBQx/>>.

SILVA, J. R. Neves da; ARENGHI, L. E. B.; LINO, A. Porque inserir física moderna e contemporânea no ensino médio? uma revisão das justificativas dos trabalhos acadêmicos. *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, v. 6, n. 1, p. 69–83, jan-abr 2013. ISSN 1982-873X. Acesso em: fev. 2025. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect/article/view/1170>>.

SIQUEIRA, F. C. As equações de maxwell e as ondas eletromagnéticas. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 9, p. 93571–93589, set. 2021.