

Enio dos Anjos

**DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ: UMA
ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO**

Dissertação submetida ao Programa de
Mestrado Nacional Profissional em
Ensino de Física da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Ensino de Física
Orientadora: Profa. Dra. Lara
Fernandes dos Santos Lavelli

Blumenau
Fevereiro de 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Anjos, Enio dos
Dualidade Onda-Partícula Da Luz: Uma Abordagem
Para O Ensino Médio / Enio dos Anjos ; orientadora,
Lara Fernandes dos Santos Lavelli, 2019.
155 p.

Dissertação (mestrado profissional) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus
Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Ensino de
Física, Blumenau, 2019.

Inclui referências.

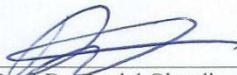
1. Ensino de Física. 2. Ótica. 3. Dualidade onda
partícula da luz. I. Fernandes dos Santos Lavelli,
Lara. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III.
Titulo.

Enio dos Anjos

DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ: UMA ABORDAGEM
PARA O ENSINO MÉDIO

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de
MESTRE EM ENSINO DE FÍSICA na área de concentração Física na
Educação Básica e aprovada em sua forma final pelo Programa de
Mestrado Profissional em Ensino de Física.

Blumenau, 06 de fevereiro de 2019.



Prof. Dr. Daniel Girardi
(Coordenador do Programa)

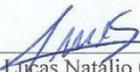
Banca Examinadora:



Prof.ª Dra. Lara Fernandes dos Santos Lavelli
(presidente) - UFSC/BNU



Prof. Dr. Licurgo Peixoto de Brito
(membro externo) – UFPA/Belém



Prof. Dr. Lucas Natálio Chavero
(membro titular) - UFSC/BNU

Dedico esta dissertação aos meus pais Eurides (*in memoriam*) e Zeni Elena, meus irmãos, minha família, minha esposa Marizete e em especial a minha orientadora Professora Dr^a Lara Fernandes dos Santos Lavelli.

.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física – UFSC – Blumenau, em especial a minha orientadora Professora Doutora Lara dos Fernandes dos Santos Lavelli, pelas inúmeras contribuições neste trabalho. Ao meu colega Rafael Roza e aos profissionais da Escola de Educação Básica Professor Honório Miranda e aos alunos das turmas 2º ano, em especial da turma 2º2 e 2º6 de 2017. Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa – Código de Financiamento 001.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”. (Sir. Isaac Newton, 1676)

RESUMO

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento e a aplicação uma sequência didática que possibilita ao professor do Ensino Médio a abordagem da dualidade onda-partícula da luz. Os principais conceitos abordados são a propagação retilínea, propriedades ondulatórias da luz, difração da luz e efeito fotoelétrico. A sequência didática é composta por duas sugestões de roteiros de experimentos, somados a um de experimento virtual que consistem na exploração do fenômeno de difração da luz e do efeito fotoelétrico. Para isto, baseou-se na teoria de sequências didáticas de Méheut; Psillos, Belluco; Carvalho, e da aprendizagem sóciointeracionista de Vygotsky. Participaram da pesquisa duas turmas de segundo ano do Ensino Médio da Escola Estadual Básica Professor Honório Miranda em Gaspar - SC. A coleta de dados ocorreu por meio de gravação de áudio, registros de fotos, atividades entregues ao professor. A sequência didática ocupou sete aulas em um cenário de duas aulas semanais em sistema bimestral. Este trabalho possibilitou que os estudantes conhecessem a natureza dual da luz, conceito que não é tradicionalmente abordado no Ensino Médio. Além disto, resultou em uma melhor interação professor-estudante e na participação mais efetiva dos estudantes.

Palavras-chave: Ensino de Física. Ótica. Dualidade onda-partícula.

ABSTRACT

This dissertation presents the development and application of a didactic sequence that enables the teacher of the High School to approach the wave-particle duality of light. The main concepts discussed are rectilinear propagation, wave properties of light, diffraction of light and photoelectric effect. The didactic sequence is composed of two suggestions of experimental scripts, added to a virtual experiment that consists in the exploration of the phenomenon of light diffraction and the photoelectric effect. For this purpose, it was based on the didactic sequence's theory of Méheut; Psillos, Belluco; Carvalho, and vygotsky's socio interactionist theory. Participated in this work two classes from the second year High School of From Professor Honório Miranda State School in the city of Gaspar – SC. Data collection was done through audio recording, photo records and activities delivered to the teacher. The didactic sequence occupied seven classes in a two weekly classes scenario of a bimonthly system. This work enabled to the students learn the dual nature of the light, concept that is not traditionally approached in the High School. Additionally, it resulted in a better teacher- student interaction and in a more effective participation of the students.

Keywords: Physics education. Optics. Wave-particle duality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Livro <i>De rerum</i> de Lucrecio.	24
Figura 2: Ilustração de um olho emitindo raios visuais.....	25
Figura 3: Diagrama esquemático da luz incidindo na interface entre um meio menos refringente ($n = n_1$) para um meio mais refringente ($n = n_2$)	26
Figura 4: Difração segundo o princípio de Huygens com frentes de onda.....	27
Figura 5: Fotografia da primeira edição do livro <i>Ótica</i> , publicado em 1704 por sir. Isaac Newton.....	29
Figura 6. Fotografia da Figura de difração produzida por um disco. Nota-se que ao centro existe um ponto iluminado	30
Figura 7: Representação do experimento de dupla fenda de Young com as respectivas interferências construtivas.....	31
Figura 8. Experimento de Faraday onde a luz entra polarizada em E e ao atravessar um vidro grosso envolve em um eletroímã que produz uma campo magnético B e ao incidir sobre o anteparo sofre uma desvio de ângulo β em sua polarização original.....	32
Figura 9. Experimento de Hertz: nos dois eletrodos que estão entre a e b são geradas grandes descargas elétricas, transmitindo por meio de ondas eletromagnéticas para outros dois eletrodos que estão em C.	33
Figura 10. Aparelho usado para medir o efeito fotoelétrico.....	34
Figura 11. Conteúdo de <i>Ótica</i> na Unidade 5, classificados indiretamente como <i>Ótica Geométrica</i> no Volume 2.....	36
Figura 12. Conteúdo de <i>Ondulatória e Física Moderna (Efeito fotoelétrico)</i> no volume 3	36
Figura13. Conteúdos de <i>Ótica e Ondulatória</i> no volume 2, nas unidades III e IV, respectivamente.....	37
Figura 14. Conteúdo de <i>Física Moderna (Efeito fotoelétrico)</i> no volume 3.....	37
Figura 15. Luz do laser atravessando o CD.....	44
Figura 16. Concepções prévias e classificação.....	50
Figura 17: Utensílio doméstico: boleador	54
Figura 18: Luz passando pelo boleador (Região iluminada em cima) atingindo uma folha branca de papel sobre a carteira	55
Figura 19: Difração da luz usando CD turma 2 ^o 2.	56
Figura 20: Difração da luz usando CD turma 2 ^o 6.	56
Figura 21: Desenho da passagem da luz pelo espaçamento constituído pelas trilhas do CD.....	57

Figura 22: Marcação dos pontos iluminados devido a passagem da luz pelo CD devido ao efeito da Difração.....	59
Figura 23: linhas de gravação de um CD “virgem” feita por um microscópio de força atômica com escala de 10 μm	60
Figura 24: CD já gravado feita por um microscópio de força atômica com escala de 5 μm com regiões “queimadas” que são mais escuras e outras onde não houve “queima” que estão mais claras, respectivamente para representar um código binário.....	60
Figura 25: Simulador do Efeito fotoelétrico	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Distribuição das aulas que compõe a sequência didática, seus respectivos procedimentos metodológicos e objetivos.....	42
Quadro 2: Classificação das respostas sobre: “O que é Luz?”após consulta em livros e internet.Turma 2º2	51
Quadro 3: Classificação das respostas sobre: “O que é Luz?”após consulta em livros e internet.Turma 2º6	51
Quadro 4: Classificação das respostas sobre: “Qual a natureza da luz?”após consulta em livros e internet.Turma 2º2.....	51
Quadro 5: Classificação das respostas sobre: “Qual a natureza da luz?”após consulta em livros e internet.Turma 2º6.....	52
Quadro 6: Classificação das respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Turma 2º2.....	52
Quadro 7:Classificação das respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Sim. Turma 2º2	53
Quadro 8:Classificação dos argumentos fornecidos nas respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Não. Turma 2º2.....	53
Quadro 9: Classificação das respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Turma 2º6.....	53
Quadro 10:Classificação dos argumentos fornecidos as respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Turma 2º6	53
Quadro 11: Reposta à pergunta: O que é de se esperar se mudamos a cor luz do laser que incide sobre o CD? Turma 2º2.....	57
Quadro 12: Resposta à pergunta: O que é de se esperar se mudamos a cor luz do laser que incide sobre o CD? Turma 2º6.....	57
Quadro 13: Valores obtidos da separação das linhas de gravação em um Cd. Turma 2º2.....	61
Quadro 14: Valores obtidos da separação das linhas de gravação em um Cd. Turma 2º6.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina
SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Educacional
EEB – Escola de Educação Básica
PPP – Projeto Político Pedagógico
LED – *Light emitting diode*
CD – *Compact Disc*
ZDR – Zona de Desenvolvimento Real
ZDP – Zona de Desenvolvimento Proximal
AUTOLABOR - Laboratório Didático Móvel

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_1 = ângulo entre raio incidente de luz e eixo normal
 θ_2 = ângulo entre raio refratado de luz e eixo normal
 d = largura da abertura de fenda
 m = ordem da interferência da luz
 θ = ângulo de difração da luz
 λ = comprimento de onda
 μ_0 = constante de permeabilidade magnética no vácuo
 ϵ_0 = constante de permissividade elétrica no vácuo
 c = velocidade da luz
 E = energia
 ν = frequência da onda eletromagnética
 K = energia cinética
 w = função trabalho

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	23
1.1. DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ: UMA VISÃO HISTÓRICA	23
1.2. ABORDAGEM NOS LIVROS DE ENSINO MÉDIO	35
1.3. PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA E REFERENCIAIS TEÓRICOS DE ENSINO-APRENDIZAGEM.....	38
2. DESCRIÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	40
3. RELATO DA APLICAÇÃO	47
3.1. REALIDADE EDUCACIONAL DO LOCAL DE PESQUISA....	47
3.2. APLICAÇÃO DO PRODUTO DIDÁTICO	48
3.2.1. 1ª Aula	49
3.2.1. 2ª aula	52
3.2.3. 3ª aula	53
3.2.4. 4ª Aula	58
3.2.5. 5ª aula	61
3.2.6. 6ª aula	62
3.2.7. 7ª aula	63
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
Referências.....	66
APÊNDICE A – Sequência didática	70
ANEXO A – Texto: Newton e as Cores	119
ANEXO B – Sugestão de Roteiro de atividade experimental: Difração da Luz utilizando Cd's	122
ANEXO C – Sugestão de Roteiro de experimento: Efeito Fotoelétrico em um LED	134
ANEXO D – Sugestão de Roteiro de experimento virtual: Efeito Fotoelétrico	140
ANEXO E – Questões (Lista de exercícios)	151

INTRODUÇÃO

Por desempenhar um papel vital em nossas vidas, a luz tem se tornado um tema bastante presente em diversas disciplinas no século 21. A luz está presente em nosso cotidiano tanto nos diversos fenômenos óticos que se manifestam – arco-íris, miragem, reflexão, aurora boreal, fluorescência, etc- quanto no uso de tecnologias baseadas na luz (NUSSENZVEIG; 1998; HALLIDAY, 2012). Um exemplo é o laser, amplamente utilizado em leitores de código de barras, impressoras, equipamentos de cirurgia, pesquisa científica, leitores de CD e DVD, indústria têxtil e uso militar. Uma outra tecnologia baseada na luz são os LEDs (light emitting diode), presentes em iluminação residencial, comercial e industrial, no mercado médico-hospitalar, na sinalização automotiva ou viária, na arquitetura ou em locais de difícil manutenção ou acesso, além de ter revolucionado a tecnologia de televisões. Processos envolvendo a luz também estão presentes em programas de geração de energia limpa através do intercâmbio dos diferentes mecanismos de transferência de energia.

É importante ressaltar que essas inúmeras aplicações da luz no nosso cotidiano deram-se graças ao desenvolvimento da ciência à cerca de sua natureza e aos fenômenos a ela relacionados. Estes conhecimentos contribuíram para o desenvolvimento da ciência moderna através do desenvolvimento de inúmeras aplicações tecnológicas em nosso cotidiano. Desta forma, à medida que o estudo da natureza da luz tem intrigado e fascinado cientistas e estudantes ao longo dos últimos séculos, ele também tem impulsionado o desenvolvimento científico, o que foi e continua sendo crucial para o desenvolvimento de novas tecnologias.

Embora os diversos fenômenos e aplicações que envolvem a natureza da luz estejam presentes em nosso cotidiano, o ensino de ótica no Ensino Médio ainda é bastante negligenciado. Esta área é abordada geralmente após o assunto de Termodinâmica, sendo separada pelos tópicos: “Ótica Geométrica” e “Ótica Ondulatória”, sendo que na distribuição didática do Ensino Médio, reserva-se geralmente apenas um bimestre para o ensino de Ótica. É importante ressaltar que natureza dual da luz é considerada como um tópico opcional no ensino de ótica para o Ensino Médio, sendo raramente abordada.

Dentre as coleções de livros didáticos mais tradicionais para o Ensino Médio podemos destacar os seguintes: “Física” (BONJORNO et al., 2013); “Física” (PIQUEIRA; CARRON; GUIMARÃES, 2013); “Física: Aula por Aula” (XAVIER; BENIGNO, 2013); “Física”

(ARTUSO; WRUBLEWSKI, 2013). Em todos estes livros, os conteúdos de Ótica encontram-se no volume 2, que é direcionado ao 2º ano do Ensino Médio. Enquanto estes livros abordam Ótica Geométrica de forma detalhada, a Ótica Ondulatória é tratada apenas de maneira superficial e concomitante a outros tópicos, como Ondulatória, Som e/ou Ondas Eletromagnéticas. Por outro lado, fenômenos de interação da luz com a matéria, como o efeito fotoelétrico, por muitas vezes encontram-se dentre os conteúdos de Física Moderna no volume 3 nas coleções já citadas. Desta forma, fica evidente que além do ensino de Ótica se dar, muitas vezes, de maneira superficial no Ensino Médio, os estudantes não chegam ao menos conhecer a natureza de seu objeto de estudo.

Neste trabalho, foi desenvolvido um produto didático, direcionado aos professores do ensino médio, para auxiliá-los na abordagem de conceitos acerca da natureza dual da luz. Este produto foi aplicado em duas turmas do 2º ano da Escola Estadual Básica Professor Honório Miranda, na cidade de Gaspar – SC.

Esta dissertação está organizada em quatro capítulos. O primeiro capítulo dedica-se à uma revisão dos conceitos físicos relacionados ao assunto, bem como dos referenciais teóricos de ensino e aprendizagem utilizados no trabalho. A descrição do desenvolvimento do produto educacional e o relato de sua aplicação compõe, respectivamente, o segundo e terceiro capítulos. No quarto capítulo, encontram-se as considerações finais do trabalho. Como apêndice à dissertação, encontra-se uma cópia do produto educacional desenvolvido e aplicado, bem como respectivos anexos.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ: UMA VISÃO HISTÓRICA

Richard Feynman disse uma vez: “a luz não se parece com nada que você já tenha visto”. Ao fazer esta afirmação, Feynman se referia à um dos fenômenos mais intrigantes e bonitos da natureza: a dualidade onda-partícula da luz.

Fenômenos óticos como sombras, reflexão da luz, arco-íris sempre fascinaram a humanidade desde seus primórdios. Possíveis explicações a esses fenômenos também surgiram no decorrer da história. Um exemplo disto é a existência de técnicas de observação astronômica e alguns conhecimentos sobre doenças da visão (DARRIGOL, 2012, p. 14 e 15) há mais de um milênio antes de Cristo. Os primeiros registros desses conhecimentos a respeito da Ótica foram dos antigos gregos que a descreveram entre os fenômenos naturais observados e, posteriormente, influenciaram a civilização Ocidental. No século VI a.C. alguns gregos romperam com a crença em forças sobrenaturais que influenciava fortemente as explicações até aquele momento formuladas. Passaram então a procurar compreender os fenômenos naturais buscando essas explicações em forças da natureza. Leucipo e Demócrito, como os primeiros atomistas buscaram explicar os fenômenos naturais através de átomos de diversos tamanhos. Contemporânea a essas primeiras teorias, existia uma visão popular de um “fogo” sendo emitido pelos olhos como raios visuais (DARRIGOL, 2012, p. 16-18). Empédocles mesmo confere aos olhos um aspecto de “lanterna”. Demócrito acreditava na sua interpretação atomista somando a do fogo visual. Epicuro e Lucrecio, que eram seguidores de Demócrito, abandonaram a crença no fogo visual e passaram a imaginar camadas finas de átomos que viajavam desde o objeto até os olhos como escrito no livro *De rerum* e, para tanto era necessária a luz do sol para ver os objetos. Este livro foi escrito no século I a.C.

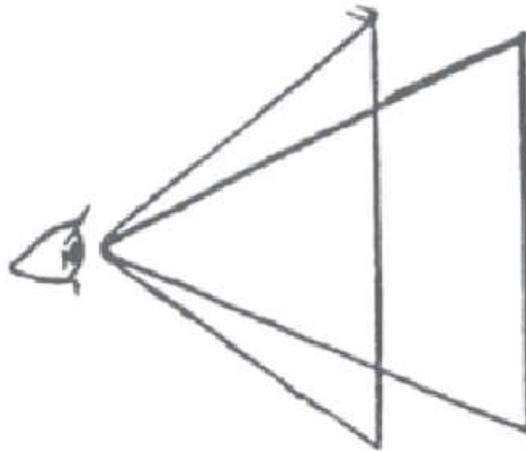


Figura 2: Ilustração de um olho emitindo raios visuais. Fonte: (TOSSATO, 2005)²

Com o fim da civilização grega, a “luz” dessa investigação filosófica foi adotada no mundo islâmico (VAUGHAN, 2014, p. 10). A civilização islâmica possuía, nessa época, grande conhecimento matemático como bases numéricas, álgebra e desenvolvimento de métodos algorítmicos. Um dos trabalhos importantes desta época é o livro *Sobre espelhos e lentes*, escrito em 984 pelo cientista Ibn Shal. Neste livro, ele mostra a focalização da luz por espelhos e lentes curvas inserindo a primeira formulação para a lei de Refração de Snell. O cientista Alhazen também forneceu importantes contribuições na área, escrevendo, entre 1011 e 1021, uma obra em sete volumes sobre ótica chamada *Kitab al-Manazir* (Livro de Óptica). Nesta obra, mostrava diversos experimentos sobre a propagação direta da luz, reflexão e refração e uma descrição detalhada do olho humano (VAUGHAN, 2014, p.10-11).

Um pouco adiante, entre os séculos XV e XVII, período compreendido pelo Iluminismo, houve o surgimento de muitos pensadores que contribuiriam para a atual compreensão do mundo e da Ótica. Dentre eles podemos destacar Galileu, Descartes e Newton.

² (TOSSATO, 2005) TOSSATO, C. R. A função do olho humano na óptica do final do século XVI Revista ScientiæSudia, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 415-41, 200. Disponível em <http://www.revistas.usp.br/ss/article/view/11044/12812> Acesso 10 dez 2018

Embora Galileu não tenha inventado o telescópio, que é atribuído ao fabricante de óculos alemão-holandês Hans Lippershey, ele o aperfeiçoou fabricando melhores lentes, otimizando assim o poder de ampliação desse instrumento em nove vezes (VAUGHAN, 2014, p. 14-15). Como esse instrumento, Galileu observou as fases de Vênus, as manchas solares e descobriu as quatro maiores luas de Júpiter, conhecida também como luas galileanas. Já René Descartes obteve de forma independente a lei para a refração da Luz, conhecida atualmente como Lei de Snell-Descartes, referindo-se também a Willebrord Snellius. Essa lei relaciona os ângulos de incidência θ_1 e de refração θ_2 da luz em relação à normal da interface entre dois meios com seus respectivos índices de refração, n_1 e n_2 . Pode-se enunciá-la como: “Numa refração, o produto do índice de refração do meio no qual ele se propaga pelo seno do ângulo que o raio luminoso faz com a normal é constante” (MARQUES; UETA, 2007). Essa lei foi obtida a partir da abordagem ondulatória da luz e pode ser escrita como

$$n_1 \cdot \text{sen}\theta_1 = n_2 \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (1)$$

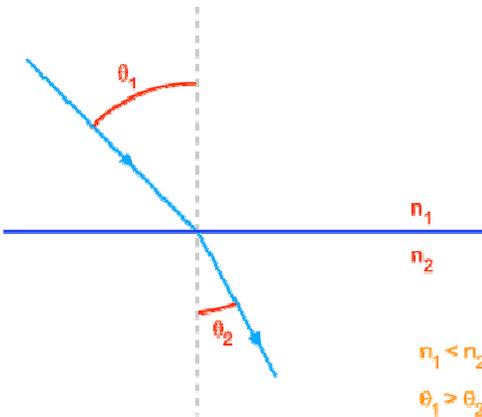


Figura 3: Diagrama esquemático da luz incidindo na interface entre um meio menos refringente ($n = n_1$) para um meio mais refringente ($n = n_2$). Fonte: (MARQUES; UETA, 2007)³

³ (Marques; Ueta, 2007) MARQUES, G C ; UETA, N. **Ótica (Básico)**. E-Livros. Disponível em <http://efisica.if.usp.br/optica/basico/refracao/snell/> Acesso em 08 dez. 2018

Outra contribuição muito importante para a Ótica Ondulatória foi dada pelo físico holandês Christiaan Huygens. Huygens afirmou que cada ponto em uma frente de onda deve agir como uma fonte de ondas secundária que, em algum momento posterior, se soma para formar uma nova frente de onda. A Figura 4 ilustra esta ideia, que ficou conhecida como o Princípio de Huygens. Nesta abordagem, Huygens contraria a abordagem corpuscular para a luz e passa a afirmar que a luz possui um caráter ondulatório.

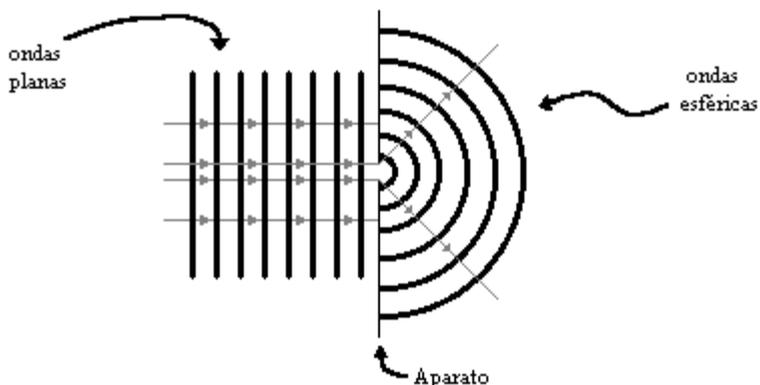


Figura 4: Difração segundo o princípio de Huygens com frentes de onda. Fonte: (LAVARDA, 2018)⁴

É interessante observar o argumento de Huygens sobre a luz descrito no livro de Richard Feynman:

“Algumas outras observações importantes são que, à medida que a luz vai de um ponto a outro, ela segue em linhas retas, se não há nada no caminho, e que os raios não parecem interferir uns nos outros. Isto é, a luz está entrecruzando-se em todas as direções da sala, mas a luz que passa pela nossa linha de visão não afeta a luz que nos vem de algum objeto. Este foi um dos argumentos mais poderosos contra a teoria corpuscular; foi usado pela Huygens” (FEYNMAN, 2008 p.26-2).

⁴ (LAVARDA, 2018) Lavarda, F.C. Experimentos de Física com materiais do dia a dia. Disponível em: <http://www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/opt13.htm>. Acesso em 08 dez. 2018

Também defensor da teoria ondulatória da luz, Robert Hooke afirmava a luz poderia ser compreendida como uma sucessão periódica de pulsos, causados por pequenas e rápidas vibrações da fonte luminosa, viajando em uma velocidade muito alta, porém finita em um meio homogêneo (DARRIGOL, 2012, p. 68-70). Hooke comparou a luz com a onda sonora nas suas propriedades mais fundamentais. Havia idéias, inclusive nesta época, sobre o Efeito Doppler e de comprimento de onda da luz, principalmente do vermelho e azul.

Apesar de alguns estudos como o de Descartes, Huygens e Hooke da interpretação ondulatória, sir. Isaac Newton preferiu explicar os fenômenos óticos baseado em uma descrição corpuscular. Em 1666, utilizando-se da refração e dispersão em um prisma, Newton conseguiu demonstrar experimentalmente a decomposição da luz branca nas diferentes cores do arco-íris. Na época era possível demonstrar matematicamente este fenômeno em termos da Ótica Ondulatória assumindo que diferentes cores da luz percorrem o meio com velocidades diferentes. Newton, no entanto, não interpretou seus resultados dessa maneira (VAUGHAN, 2014, p.11-12). Em seu livro *Ótica*, ele comparou as “partículas” de luz à pequenas esferas, massivas e muito rápidas fornecendo explicações satisfatórias sobre a decomposição espectral da luz branca, polarização, interferência da luz (SILVA; MARTINS, 2003).

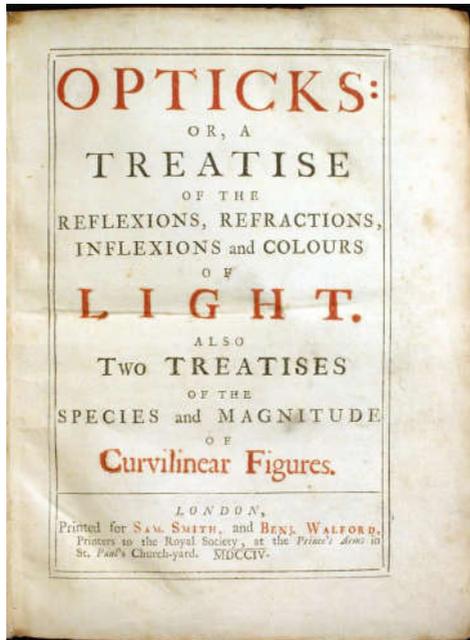


Figura 5: Fotografia da primeira edição do livro Ótica, publicado em 1704 por sir. Isaac Newton. Fonte: (WIKIPÉDIA 2, 2018)⁵

Devido aos aspectos anteriormente explanados e à respeitosa reputação de sir. Isaac Newton, a teoria corpuscular da luz foi aceita por mais de um século. Entretanto, há de ressaltar que Newton não tinha certeza que sua teoria para a luz estava correta, proferindo a seguinte frase: “a partir da minha teoria defendo a corporeidade da luz; mas o faço sem nenhuma positividade absoluta” (PIRES, 2011, p. 264). Existiam aspectos dos quais a teoria newtoniana não explicava, como a aberração cromática, que só poderia ser explicada pela teoria ondulatória da luz.

Mesmo quase um século após a morte de Isaac Newton, a teoria corpuscular da luz exercia influência muito grande. Isto ficou evidente na dificuldade da comunidade científica em aceitar a explicação do fenômeno de difração da luz, como o que ocorreu em 1818, com Augustin-Jean Fresnel. Ao observar a aparição de um ponto brilhante na sombra de um disco iluminado, conforme ilustra a Figura 6, Fresnel

⁵(WIKIPÉDIA 2, 2018) Wikipedia, *Opticks*. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Opticks> Acesso em 08 ago. 2018

submeteu um artigo à Academia Francesa de Ciências, explicando este fenômeno a partir da abordagem da ótica ondulatória.



Figura 6. Fotografia da Figura de difração produzida por um disco. Nota-se que ao centro existe um ponto iluminado. Fonte: (Halliday, 2012)

Embora seja um marco importante no desenvolvimento da ótica ondulatória, o trabalho de Fresnel aconteceu um pouco antes do famoso experimento de fendas duplas, realizado por Thomas Young em 1803. Esse experimento consistiu na passagem de luz por duas pequenas fendas, demonstrando que a projeção observada em um anteparo é de franjas claras alternado com escuras, chamadas também de interferência construtiva e destrutiva da luz, respectivamente. Um diagrama esquemático deste experimento está ilustrado na Figura 7.

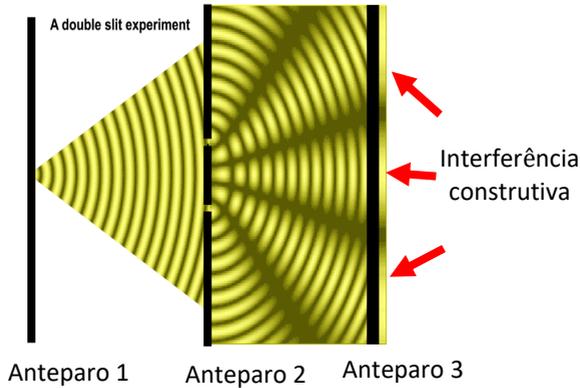


Figura 7: Representação do experimento de dupla fenda de Young com as respectivas interferências construtivas. Fonte: (WIKIPÉDIA 3, 2018)⁶

A equação obtida na época relacionava o tamanho da abertura da fenda (d), com o comprimento de onda (λ) da luz e a ordem da interferência (m) da região de máximo:

$$d \cdot \text{sen}\theta = m \cdot \lambda \quad (2)$$

O experimento de dupla fenda de Young consistiu na primeira evidência conclusiva da natureza ondulatória da luz. No entanto, haviam ainda dúvidas a respeito da natureza da luz.

Cabe ainda destacar na época Michael Faraday que realizou o experimento onde fez passar luz por um vidro “grosso” envolto em um eletroímã conseguiu mudar a polarização da luz, mostrando suas características eletromagnéticas, conforme ilustra a Figura8.

⁶ (WIKIPÉDIA 3, 2018) Wikipedia. A Double slit experiment. Disponível em: Acesso em 10 ago. 2018

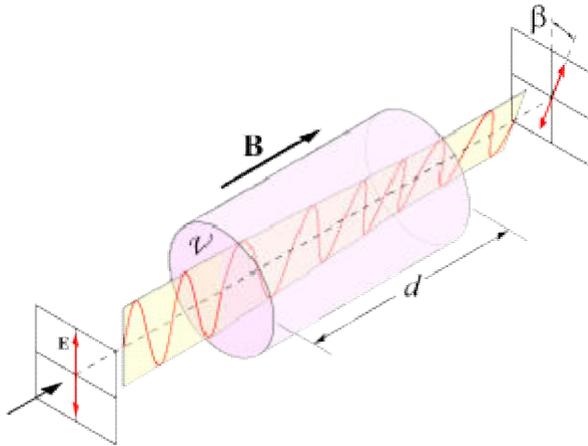


Figura 8. Experimento de Faraday onde a luz entra polarizada em E e ao atravessar um vidro grosso envolto em um eletroímã que produz uma campo magnético B e ao incidir sobre o anteparo sofre uma desvio de ângulo β em sua polarização original. Fonte: (WIKIPEDIA 4, 2018)⁷

Inspirado pelos resultados experimentais de Faraday, James Clerk Maxwell (1831 - 1879) foi capaz de prever matematicamente a existência das ondas eletromagnéticas. A velocidade dessas ondas poderia ser calculada a partir de constantes universais fundamentais: a permissividade do vácuo ϵ_0 e a permeabilidade magnética do vácuo μ_0 ,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \quad (3)$$

Quando Maxwell calculou esse valor, ele descobriu que essa velocidade era a mesma que a velocidade medida para a luz, concluindo que, de fato, a luz é uma forma de radiação eletromagnética.

Procurando comprovar as previsões de Maxwell, Henrich Hertz construiu um gerador de ondas eletromagnéticas, em 1887. Uma vez que ondas eletromagnéticas são geradas por cargas aceleradas, o experimento de Hertz consistia em grandes descargas elétricas entre dois eletrodos, que era transmitido para outros eletrodos que não estavam ligados aos primeiros, conforme esquematizado na Figura 9.

⁷ (WIKIPEDIA 4, 2018) WIKIPEDIA, Efeito Faraday. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Faraday Acesso em 11 dez 2018

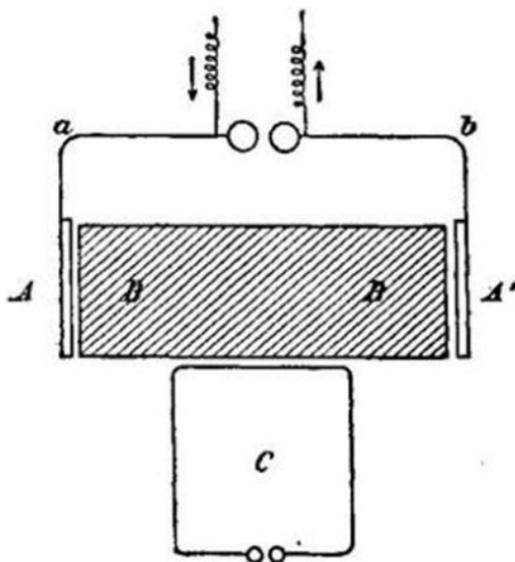


Figura 9. Experimento de Hertz: nos dois eletrodos que estão entre a e b são geradas grandes descargas elétricas, transmitindo por meio de ondas eletromagnéticas para outros dois eletrodos que estão em C. Fonte: (MANGILI, 2012)⁸

Hertz percebeu que essas descargas elétricas eram facilitadas conforme incidia luz sobre esses eletrodos geradores. Hertz acabou descobrindo, nesse momento as ondas de rádio, que tem comprimento de onda λ muito maior que a radiação visível. Porém não formalizou seus conhecimentos a respeito do efeito fotoelétrico.

Quando estudava ondas eletromagnéticas, Hertz percebeu que as faíscas entre os eletrodos aparentavam maior intensidade quando iluminadas por luz ultravioleta. Esta foi a primeira demonstração do efeito fotoelétrico muitas vezes atribuído a erroneamente a Einstein. (NUSSENZVEIG, 2014).

“É um dos fatos paradoxais e fascinantes na história da ciência que Hertz tenha notado, sem suas experiências o efeito que mais tarde Einstein

⁸(MANGILI, 2012) MANGILI, A. I. Heinrich Rudolph Hertz e a “descoberta” do efeito fotoelétrico: Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula. *Ciência e Ensino* Volume 6, 2012 – pp. 32-48

usou para contradizer outros aspectos da teoria eletromagnética clássica. Hertz descobriu que uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorre mais facilmente quando se faz incidir sobre um deles luz ultravioleta” (EISBERG; RESNICK, 2010, p. 51).

Pouco tempo após os experimentos de Hertz, Albert Einstein, utilizou um aparelho que consistia de dois eletrodos, A e B, no interior de um invólucro de vidro. Ao incidir luz no eletrodo A, elétrons eram ejetados e podiam ser detectados ao atingirem o eletrodo B através de galvanômetro conforme, conforme ilustra a Figura 10. Neste experimento, existia também uma chave inversora de polaridade, que poderia ser utilizada para inverter a diferença de potencial. Um fato interessante é que, ao inverter a chave polarizadora, a corrente fotoelétrica não cessa imediatamente, mostrando que esses fotoelétrons são emitidos com alguma energia cinética.

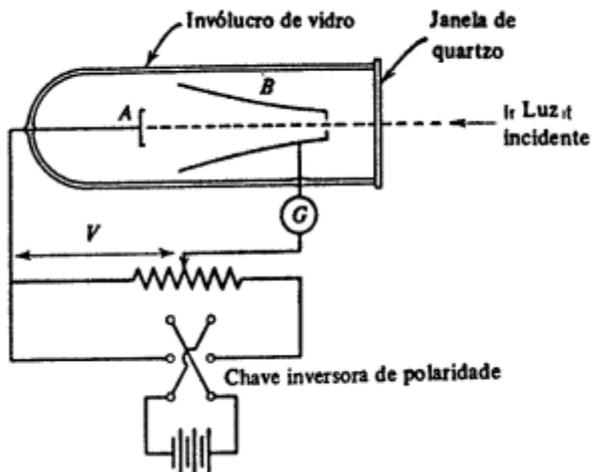


Figura 10. Aparelho usado para medir o efeito fotoelétrico. Fonte: (EISBERG; RESNICK, 2010, p. 52)

Einstein argumentou sobre experiências óticas que eram bem conhecidas na época e que envolviam interferência e difração da luz, descartando que estas deveriam envolver um grande número de fótons, sendo seus resultados médias do comportamento de fótons individuais

(EISBERG; RESNICK, 2010, p.52). Ele mostrou que os fótons emitidos por uma fonte não percorrem sua trajetória como simples partículas clássicas, mas sim como ondas. Porém, sua teoria não descrevia a propagação da luz como apenas “ondas clássicas”, mas como pacotes de energia (E) discretos em que a energia desses pacotes era proporcional à frequência (ν) através da seguinte equação (EISBERG; RESNICK, 2010, p.52)

$$E = h\nu \quad (4)$$

Nesta relação, h é a constante de Planck. Einstein considerou ainda que, quando um elétron é emitido por um metal, sua energia cinética (K) deve ser:

$$K = h\nu - w \quad (5)$$

Sendo w a função trabalho, que é a energia necessária para retirar o elétron desse metal. Dessa forma, Einstein descreveu a luz como sendo um pacote de fótons que pode interagir com a matéria de forma corpuscular, mesmo propagando-se como onda, sendo esta a base da teoria da dualidade onda-partícula da luz.

1.2. ABORDAGEM NOS LIVROS DE ENSINO MÉDIO

Foi realizada uma análise de quatro coleções de livros didáticos do Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLD 2015): “Física” (ARTUSO; WRUBLEWSKI, 2013), “Física” (BONJORNO et al. 2013)⁹, “Física” (PIQUEIRA, CARRON; GUIMARÃES, 2013), “Física: Aula por Aula” (XAVIER; BENIGNO, 2013), sendo as quais o autor tem maior familiaridade e/ou já utilizou como “*livro texto*” em sua carreira profissional. Em todos estes livros, os conteúdos de Ótica encontram-se no volume 2, que é direcionado ao 2º ano do Ensino Médio. Enquanto estes livros abordam Ótica Geométrica de forma detalhada, a Ótica Ondulatória é tratada apenas de maneira superficial e concomitante a outros tópicos, como Som e Ondas Eletromagnéticas. Por outro lado, fenômenos de interação da luz com a matéria, como o efeito fotoelétrico, por muitas vezes encontram-se na unidade de Física Moderna e Relatividade (ou apenas Física Moderna),

⁹ Livro didático utilizado na escola onde o autor leciona

e após ondas eletromagnéticas, ou eletromagnetismo no volume 3 nas coleções já citadas, usados no 3º ano do Ensino Médio.

Para ilustrar a estruturação dos conteúdos abordados por seus índices são exibidos da Figuras 11 à 14.

Volume II (304 páginas)

Unidade 1 – Os Caminhos da Física

A Terminologia e a Óptica na Sociedade.

Unidade 2 – Mecânica dos Fluidos

Hidrostática; Hidrodinâmica.

Unidade 3 – Calorimetria

Terminologia; Dilatação Térmica; Quantidade e Trocas de Calor; Calor e Mudança de Estado; Transmissão de Calor.

Unidade 4 – Termodinâmica

Comportamento Térmico dos Gases; As Leis da Termodinâmica e as Máquinas Térmicas.

Unidade 5 – Óptica

Introdução ao Estudo da Óptica; Reflexão da Luz e Espelhos Planos; Reflexão da Luz nos Espelhos Esféricos; Refração da Luz; Lentes Esféricas.

Figura 11. Conteúdo de Óptica na Unidade 5, classificados indiretamente como Óptica Geométrica no Volume 2. Fonte: (XAVIER; BENIGNO, 2013)

Volume III (320 páginas)

Unidade 1 – Os Caminhos da Física

A História do Eletromagnetismo: da Grécia Antiga à Física Moderna.

Unidade 2 – Eletrostática

Introdução à Eletrostática; Força e Campo Magnético; Potencial Elétrico; Condutores e Capacidade Elétrica.

Unidade 3 – Eletrodinâmica

Circuitos Elétricos I – Corrente Elétrica e Resistores; Circuitos Elétricos II – Geradores e Receptores.

Unidade 4 – Eletromagnetismo

Magnetismo; Campo Magnético e Corrente Elétrica; Força Magnética; Indução Eletromagnética.

Unidade 5 – Ondulatória

Movimento Harmônico Simples; Ondas; Acústica; Ondas Eletromagnéticas.

Unidade 6 – Física Moderna

Teoria da Relatividade; Física Quântica; Física Nuclear.

Figura 12. Conteúdo de Ondulatória e Física Moderna (Efeito fotoelétrico) no volume 3. Fonte: (XAVIER; BENIGNO, 2013)

Volume 2 (288 páginas)

Unidade I - Termologia:

Termometria; Calorimetria; Mudanças de fase; Transmissão de calor; Dilatação térmica.

Unidade II - Termodinâmica:

Estudo dos gases; Leis da termodinâmica.

Unidade III - Óptica:

Conceitos fundamentais de Óptica; Reflexão da luz; Espelhos esféricos; Refração da luz; Lentes esféricas; Instrumentos ópticos.

Unidade IV - Ondulatória:

Ondas; Fenômenos ondulatórios; Acústica.

Figura 13. Conteúdos de Ótica e Ondulatória no volume 2, nas unidades III e IV, respectivamente. Fonte: (BONJORNO et al., 2013)

Volume 3 (304 páginas)

Unidade I - Eletrostática:

Força elétrica; Campo elétrico e potencial elétrico

Unidade II - Eletrodinâmica:

Corrente elétrica; Resistores; Geradores elétricos; Receptores elétricos

Unidade - III Eletromagnetismo:

Campo magnético; Força magnética; Indução eletromagnética; Ondas eletromagnéticas

Unidade IV - Física Moderna:

Teoria da relatividade restrita; Física quântica; Radioatividade

Figura 14. Conteúdo de Física Moderna (Efeito fotoelétrico) no volume 3. Fonte: (BONJORNO et al., 2013)

Percebe-se que a abordagem da ótica ondulatória, bem como o efeito fotoelétrico é tratado de forma superficial nestes livros. Um exemplo disto é o tópico difração que, em geral, ocupa em média apenas uma página nas coleções evidenciadas, considerando a teoria e figuras correspondentes. No melhor dos cenários, o estudante pode ter uma visão mais completa sobre a luz no terceiro ano do Ensino Médio, ao ter contato com o efeito fotoelétrico. Esta situação, no entanto, infelizmente nem sempre se concretiza devido ao escasso tempo das aulas de Física nessa etapa da Educação Básica, principalmente na rede pública de ensino.

Desta forma, a análise destes livros permitiu concluir que a Ótica Geométrica é abordada de forma satisfatória, com o detalhamento de vários tópicos como reflexão da luz, refração da luz, espelhos, lentes. Por outro lado, evidenciou-se que o ensino de Ótica Ondulatória é por muitas vezes negligenciado e, sobretudo, realizado de forma desconexa

ao primeiro tópico. É importante ressaltar que natureza dual da luz é considerada como um tópico opcional no ensino de ótica para o Ensino Médio, sendo raramente abordada. Os estudantes estudam tópicos de ótica sem ao menos conhecer natureza de seu objeto de estudo.

1.3. PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA E REFERENCIAIS TEÓRICOS DE ENSINO-APRENDIZAGEM

Uma sequência didática tem como objetivo ser uma continuidade de aulas e/ou momentos e/ou atividades que perpassam por meio de atividades diferenciadas, de investigação, de participação, de apropriação de conhecimento por parte do estudante, culminando em um objetivo de conteúdo a ser ensinado (MÉHEUT E PSILLOS, 2004). Para a construção do produto educacional, teve-se como base o artigo “Uma proposta de sequência de ensino investigativa sobre quantidade de movimento, sua conservação e as leis de Newton” (BELLUCO E CARVALHO, 2014), e aproveitaram-se também elementos do trabalho de “Sequências de ensino-aprendizagem: objetivos e instrumentos para a investigação em educação científica” (MÉHEUT E PSILLOS, 2004), e também o plano de fundo a teoria sócio interacionista de Lev Vygostky (1991 e 2001).

Ao propor uma sequência de didática no Ensino Médio inspirada nos artigos anteriormente citados, onde o ponto de partida é dos conceitos prévios e que passam por momentos de investigação, de experimentação, de explicação do professor, nota-se que procura-se contemplar a teoria sóciointeracionista aplicada a essa situação, onde a Zona de Desenvolvimento Real (ZDR), é onde o estudante se encontra em termos de conhecimentos e operações e a Zona de Desenvolvimento Proximal (VYGOSTKY, 1991; 2001), que é onde o estudante pode chegar em termos de conhecimento e operações, e para isso o papel do docente nesse tipo de atividade é de propiciar momentos de interação aluno-professor e aluno-aluno e, não menos importante, fazer a mediação dos conhecimentos científicos com os conhecimentos prévios do aluno e ao final processo, “ampliando” a ZDR do estudante. Procura-se, ainda, contemplar o que está nas bases do Ensino Médio descrito nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), no início na busca compartilhada de informações entre o professor e os alunos, mas com o professor assumindo sua posição de “curador” dessas informações, disponíveis na internet, em livros, em outras palavras buscando a

autonomia do aluno, mas garantindo seu acesso a conhecimentos científicos. Percebe-se que:

“Propõe-se, no nível do Ensino Médio, a formação geral, em oposição à formação específica; o desenvolvimento de capacidades de pesquisar, buscar informações, analisá-las e selecioná-las; a capacidade de aprender, criar, formular, ao invés do simples exercício de memorização” (BRASIL, 2000, p. 5).

Outro aspecto que corrobora com este trabalho é da seleção de conteúdo, que neste sentido tem aspectos da Física Clássica e principalmente de Física Moderna, buscando como resultado final ser uma referência ao Ensino de Ótica no Ensino Médio, principalmente em uma escola pública, com cenário desafiador, onde deve-se selecionar o que é necessário ser visto pelo estudante, argumento este também utilizado nos Parâmetros Curriculares Nacionais:

“O vasto conhecimento de Física, acumulado ao longo da história da humanidade, não pode estar todo presente na escola média. Será necessário sempre fazer escolhas em relação ao que é mais importante ou fundamental, estabelecendo para isso referências apropriadas” (BRASIL, 2002, p. 4).

Por fim, não menos importante, buscar a formação integral do educando (Santa Catarina, 2014), proporcionando momentos de interação com o professor, com os colegas, com atividades experimentais, estimulando-o a participar.

2. DESCRIÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

O produto didático desenvolvido neste trabalho consiste em uma sequência didática que tem por finalidade auxiliar professores do Ensino Médio a abordar a dualidade onda partícula da luz com seus estudantes. A construção desta sequência didática foi norteadada pela teoria sócio interacionista de Lev Vygostky, além dos trabalhos citados na seção 1.3, buscando ser uma sequência lógica de ensino dos modelos corpuscular e ondulatório da luz, abordando conceitos como propagação retilínea, propriedades ondulatória da luz, difração da luz, efeito fotoelétrico, entre outros. O quadro 1 resume a maneira com que as aulas que compõe a sequência didática foram organizadas.

Aula/Momento	Procedimentos Metodológicos	Objetivos
1ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Investigação das concepções prévias sobre a natureza da luz, questionando os alunos - Anotação das respostas no quadro; - Classificação das repostas por meio de suas semelhanças e/ou hierarquias; - Pesquisa na <i>internet</i> e/ou em livros didáticos de Ensino Médio -Atividade em grupo: responder as perguntas: - O que é luz? Qual é sua natureza? 	<ul style="list-style-type: none"> - Evidenciar os conceitos prévios sobre a natureza da luz;
2ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Discussão a partir da leitura das respostas fornecidas pelos grupos de alunos em aula anterior. - Leitura do texto “Ótica Newtoniana” e/ou um vídeo nessa temática - Atividade em grupo: responder à pergunta: - A luz propaga-se em linha reta? 	<ul style="list-style-type: none"> - Promover a discussão dos alunos a sobre a natureza da luz; - Caracterizar a natureza da luz como partícula;
3ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Revisão do modelo 	-

	<p>corpúscular de Newton para a luz.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Demonstração da passagem da luz por pequenos orifícios, como de um ralador de queijo - Realização da primeira atividade experimental: passagem da luz por um CD com a parte refletora descascada - Atividade em grupo: responder as questões do roteiro do experimento sobre a propagação ondulatória da luz; 	<p>Observar/verificar o comportamento ondulatório da luz;</p>
4ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Revisão e problematização sobre o caráter ondulatório da luz; Deve-se problematizar com os alunos o que foi observado; - Auxiliar e/ou ensinar a realizar os cálculos do experimento sobre o fenômeno de difração da luz; - Atividade em grupo: cálculos do experimento sobre a difração da luz; 	<ul style="list-style-type: none"> - Efetuar cálculos em relação ao comportamento ondulatório da luz;
5ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Revisão e problematização sobre o caráter ondulatório da luz; Deve-se problematizar com os alunos o que foi observado e do cálculo realizado; - Revisão e problematização sobre o caráter corpúscular da luz; - Realização do experimento do Efeito fotoelétrico, incidindo luz de diferentes lasers sobre um LED. - Atividade em grupo: 	<ul style="list-style-type: none"> - Confrontar a teoria corpúscular (Newton) e ondulatória da luz

	responder as questões do roteiro do experimento sobre a propagação corpuscular da luz e efeito fotoelétrico;	
6ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Revisão e problematização sobre o caráter corpuscular da luz e efeito fotoelétrico verificado na última aula; - Revisão e problematização sobre o caráter ondulatório da luz; - Apresentação de vídeo e/ou simulação na temática - Exposição de que a luz pode se comportar como onda e partícula ao mesmo tempo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Confrontar a teoria ondulatória da luz com a corpuscular e efeito fotoelétrico (Einstein) - Concluir que a luz se comporta como onda e partícula ao mesmo tempo
7ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Verificação da aprendizagem por meio de resolução da lista de exercícios; 	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar a aprendizagem dos alunos através da resolução de exercícios sobre a Natureza da Luz presentes no ENEM

Quadro 1: Distribuição das aulas que compõe a sequência didática, seus respectivos procedimentos metodológicos e objetivos

A aplicação do produto se perpassa em aulas, conforme descritas a seguir.

1ª Aula

Na 1ª aula de aplicação tem-se a fase de investigação das concepções prévias dos alunos a respeito da natureza da luz por meio de perguntas como: “O que é luz?”, “Qual é sua natureza?”. As respostas deverão ser anotadas no quadro pelo professor, sendo posteriormente classificadas por meio de suas semelhanças e/ou hierarquias. Após esse primeiro diagnóstico, deve encaminhar os alunos para uma pesquisa de respostas para essas perguntas na *internet* (usando computadores de sala de informática, ou seus próprios smartphones) e/ou em livros didáticos. Após a realização desta pesquisa, os alunos devem transcrever cada

resposta em no máximo dez linhas. É importante que essa resposta seja feita em grupo, possibilitando momentos de discussão entre os alunos.

2ª Aula

Na 2ª aula de aplicação, o professor deve promover uma discussão a partir da leitura das respostas fornecidas pelos grupos de alunos em aula anterior. Após isso, o professor deve mobilizar os alunos a lerem materiais sobre ótica Newtoniana. Sugere-se texto “Ótica Newtoniana” (SANTOS, 2017) e/ou o vídeo indicado na referência (TVO, 1984). A partir dessas atividades, os alunos poderão ter mais argumentos sobre modelo corpuscular de Newton, corroborando, em parte, com as respostas fornecidas por eles na aula anterior. Ao final dessa aula, novamente em grupos, os alunos, devem responder se a luz se propaga de forma retilínea, entregando ao professor essa atividade, obedecendo ao critério de até dez linhas.

3ª Aula

A 3ª aula deve ser iniciada através de uma recapitulação por parte do professor, que irá reforçar o modelo corpuscular de Newton para a luz. Na sequência, o professor deve conduzir os alunos a primeira atividade demonstrativa. Esta atividade consiste na passagem da luz por pequenos orifícios, como de um ralador de queijo, por exemplo. Os alunos, em seguida, devem relatar o que viram, respondendo para a turma se Newton acertou em afirmar que a luz se propaga em linha reta. Concluída essa atividade, o professor conduz os alunos, em grupos, a realizar a primeira atividade experimental. Esta atividade consiste na passagem da luz por um CD com a parte refletora descascada (BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS, 2009), conforme Figura 15 e tem como objetivo confrontar a abordagem corpuscular da luz. O aparecimento de mais de um ponto de luz na parede deve ser esclarecido pelo professor através do fenômeno de difração da luz, fenômeno puramente ondulatório.



Figura 15. Luz do laser atravessando o CD Fonte:(Anexo B)

Ao final desta atividade há questões a serem respondidas no próprio roteiro do experimento (Anexo B). Estas questões versam sobre o que foi observado, incluindo uma atividade com o cálculo do espaçamento existente entre as grades de difração do CD, que é da ordem de 10^{-6} metro (μm).

4ª Aula

A 4ª aula deve ser iniciada pelo professor problematizando tudo o que ocorreu na última aula, com perguntas como: O que foi observado na aula passada? O que percebemos na primeira demonstração que fizemos usando os utensílios domésticos? Como podemos explicar esse experimento, da luz aparentemente se “dividindo”? (...) e focar, principalmente, no experimento de difração da luz em um CD. Após esta problematização, o professor deve auxiliar os alunos a realizar o cálculo do espaçamento das grades de difração no CD, fornecendo explicações, se necessário. Ao final da aula o professor recolhe essa atividade.

5ª Aula

A 5ª aula deve ser iniciada relembando-se o que foi realizado nas últimas aulas: a verificação, por meio de experimento, de que a luz se comporta como onda, em contraste com a segunda aula onde foram apresentados fortes indícios de que o modelo corpuscular de Newton

estava correto. Na sequência e, sem esclarecer qual modelo é o mais correto, o professor deve mobilizar os alunos para realizarem outro experimento em que irá se demonstrar o efeito fotoelétrico (Anexo C). Este experimento consiste em medir a voltagem, por meio de um multímetro, em um LED sob incidência de *lasers* com emissão de diferentes comprimentos de onda (vermelha, verde e violeta) e luz branca, onde, em geral, a voltagem se aproxima de zero milivolts quando se incide luz vermelha e de alguns volts quando a luz é violeta. Após a realização dessa atividade os alunos irão responder, em grupos, perguntas que constam no roteiro, referente ao que foi observado, como a diferença na voltagem medida para os diferentes comprimentos de luz incidentes.

6ª aula

Na 6ª aula o professor inicia lembrando os alunos de tudo o que foi realizado até o momento, e enfatizando que na última atividade foi verificado o comportamento corpuscular da luz, com o efeito fotoelétrico. Na sequência o professor pode apresentar o vídeo (DR. QUANTUN, 2017) e/ou apresentar a simulação sobre o efeito fotoelétrico (PHET, 2017) (Anexo D). Após isso deve explicar e concluir que, atualmente, a luz se comporta como onda e partícula ao mesmo tempo. Também deve mostrar que no decorrer da História o conceito de luz oscilou entre o modelo corpuscular e o modelo ondulatório, mostrando que conhecimento científico tem caráter provisório, sendo substituído por outro modelo mais “robusto”.

7ª aula

Na última aula da aplicação desta sequência o professor deve relembrar tudo o que foi feito e, principalmente, a conclusão a respeito do comportamento dual da luz. Posteriormente, deve como procedimento de verificação de conhecimento a respeito desse assunto, pedir aos alunos que respondam uma lista de exercícios sobre essa temática. Ao final deverá corrigir com os alunos essa Lista de Exercícios.

Avaliação da sequência didática

Como avaliação da aplicação desta sequência o professor pode fazer perguntas sobre o desenvolvimento, como as se encontram no Apêndice, subseção 2,8,3.

Como avaliação por meio de notas ou conceitos, o professor poderá utilizar as atividades que os alunos entregaram (5 atividades)

como uma avaliação contínua ou de trabalho. Com relação as questões da lista de exercícios, estas poderão embasar uma Prova. E por fim, se for viável, estimular a participação dos estudantes por meio de pontuação extra.

Vantagens da aplicação dessa sequência

As vantagens da aplicação dessa sequência estão no ensino-aprendizagem deste conteúdo que vão desde o modelo corpuscular da luz, modelo ondulatório e modelo dualidade onda-partícula, percorrendo assim uma sequência lógica de desenvolvimento da Física a partir de noções que inicialmente são senso comum até o conhecimento científico. Com relação ao tempo de aplicação que é de sete aulas, possibilitando ao professor continuar neste tema e/ou realizar avaliação.

3. RELATO DA APLICAÇÃO

3.1. REALIDADE EDUCACIONAL DO LOCAL DE PESQUISA

A aplicação do produto desenvolvido ocorreu na Escola Estadual Básica Professor Honório Miranda, em Gaspar-SC, no Médio Vale do Itajaí. Com relação ao espaço físico e de equipamentos disponíveis para as aulas, dispõe-se de: uma sala de professores, doze salas de aulas, um auditório, uma biblioteca, todos esses ambientes são climatizados, um espaço de eventos, uma quadra de esporte coberta, mas não finalizada, um laboratório de Informática com trinta computadores, 12 Televisores, sendo um em cada sala de aula, dois aparelhos de DVD que funcionam, dois retroprojetores, cinco aparelhos de multimídia; com relação ao laboratório de Ciências, não existe, sendo que foi transformado em sala de aula e hoje utilizado por turmas regulares, e os poucos materiais estão guardados no depósito e em carrinho do Laboratório Didático Móvel (AUTOLABOR), existe internet banda larga disponível em todos estes computadores e wifi para uso dos professores em seus equipamentos pessoais.

Pode-se dizer que esta escola não faz parte de uma comunidade organizada, pois localiza-se no centro e recebe alunos de várias regiões, algumas até vinte quilômetros da mesma, incluindo municípios vizinhos. Esta escola foi reorganizada e tem 28 turmas de Ensino Médio, não oferecendo Ensino Fundamental.

Ainda, segundo o Projeto Político Pedagógico (EEB PROFESSOR HONÓRIO MIRANDA, 2017) desta Escola, nota-se a busca por uma escola e uma educação pública de qualidade:

“A comunidade espera que a escola cumpra sua função garantindo conhecimento para todos, com profissionais qualificados e atualizados, capazes de desenvolver sujeitos conscientes (...) promovendo o desenvolvimento integral” (EEB PROFESSOR HONÓRIO MIRANDA, 2017).

O cenário e a realidade das aulas de Física ministradas pelo autor nesta escola são as seguintes: sistema bimestral de duas aulas semanais, totalizando de dezesseis a vinte e duas aulas por bimestre de quarenta e cinco minutos; os conteúdos são trabalhados por pouco mais da metade do total dessas aulas, as avaliações (provas, trabalhos) e recuperações ocupam o restante do tempo e, geralmente, feitas em sala de aula, isso excluindo aulas em que há eventos na escola; são aulas, em geral, expositivas, com algumas demonstrações, buscando

contextualizar os conceitos trabalhados. Com relação aos conteúdos a serem trabalhados e estão no plano de curso do 2º ano do Ensino Médio: Termodinâmica (Termometria, Calorimetria), Ótica (Geométrica e Física), Ondulatória, ou seja, a princípio três “grandes partes” da ciência Física (Anexo D); Com relação a exploração das do uso de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC’s) nas aulas tem-se de maneira esporádica, desde Televisão, DVD, Laboratório de Informática.

Foram escolhidas duas turmas da segunda série do Ensino Médio para a aplicação do produto educacional. Com o objetivo de validar a sequência didática há um atraso de uma semana entre as atividades aplicadas na turma 2 em relação a turma 1. A turma 1 é do turno da manhã e, em geral, e foi escolhida por ter mais facilidade na aprendizagem dos conteúdos em detrimento de outras três turmas desta série neste período. Outro motivo é a maior participação nas aulas que esta turma tem relação as demais, porém com certo destaque em atividades que envolvam arte ou mesmo atividades em grupo. Também há duas alunas com necessidades especiais acompanhadas por uma professora com formação em Pedagogia (2º professor). Cabe ainda relatar, no contraturno, a maioria dos alunos trabalham – geralmente no Comércio, Setor de Serviços ou Malharias (chamadas de Facções nesta região) - e/ou fazem cursos técnicos em Instituições como do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Apesar disto, nenhum destes alunos reprovou no Ensino Médio. Já a segunda turma escolhida (turma 2), tem suas aulas no período vespertino e possui, e foi escolhida por ter mais alunos com dificuldades de aprendizagem na disciplina quando comparada à turma 1 ou as outras duas de mesma série neste período. O outro motivo é a notória a participação em eventos que envolvem atividades artísticas na escola ou no envolvimento em aulas práticas na disciplina. Nesta turma há três alunos com necessidades especiais e que são também acompanhados por uma professora com formação em Pedagogia (2º professor). Nesta turma há um aluno que reprovou no Ensino Médio. Destaca-se que a maioria dos alunos fazem cursos técnicos em Instituições como SENAI, IFSC, e alguns trabalham no período contrário, como observado na turma 1.

Cabe ainda relatar que o autor é professor efetivo de Física desde o ano de 2013.

3.2. APLICAÇÃO DO PRODUTO DIDÁTICO

A aplicação do produto didático ocorreu entre os dias 11 de outubro a 14 de novembro de 2017 nas duas turmas de segundo ano do Ensino Médio da Escola de Educação Básica Professor Honório Miranda em Gaspar-SC, citadas anteriormente.

Na turma 2º 2 do matutino as aulas ocorriam em dois dias da semana e na 2º 6 do período vespertino as aulas ocorriam em apenas um dia, pois eram geminadas. A análise da aplicação está separada em aulas.

No primeiro momento de aplicação foram discutidos com os alunos os principais aspectos do produto, como: papel de mediação do professor, organização e dinâmica das atividades e processo avaliativo do bimestre em questão. Essa fase é bem importante pois, habituados à metodologia tradicional de ensino, os alunos geralmente esperam do professor respostas prontas sobre suas dúvidas. Esclareceu-se que esta postura deveria ser evitada diante dos muitos momentos de investigação que se seguiriam.

Com relação à coleta de dados foram usados os seguintes métodos: gravação do áudio das aulas, fotos e atividades entregues ao professor. Outro dado a se considerar é que na turma 2º 2 haviam 35 alunos matriculados e na 2º 6, 26 alunos matriculados.

3.2.1. 1ª Aula

Na primeira aula, o professor buscou concepções do que seria a luz, problematizando com as seguintes perguntas: - O que é luz? - Qual é sua natureza?

A respeito da pergunta “O que é luz?” Surgiram várias hipóteses, que foram citadas pelos alunos de forma oral como:

- “*raios emitidos pelo Sol e/ou lâmpadas*”,
- “*energia*”,
- “*algo veloz*”,
- “*radiação*”.

Em relação à pergunta a respeito da natureza da luz, obteve-se as respostas citadas pelos alunos:

- “*forma de um tipo de radiação do Sol*”,
- “*forma de energia*”
- “*algo relacionado com átomos*”

Após esta etapa, o professor classificou por meio de semelhanças e hierarquia as ligações entre as palavras citadas, como pode ser visto na Figura 16.

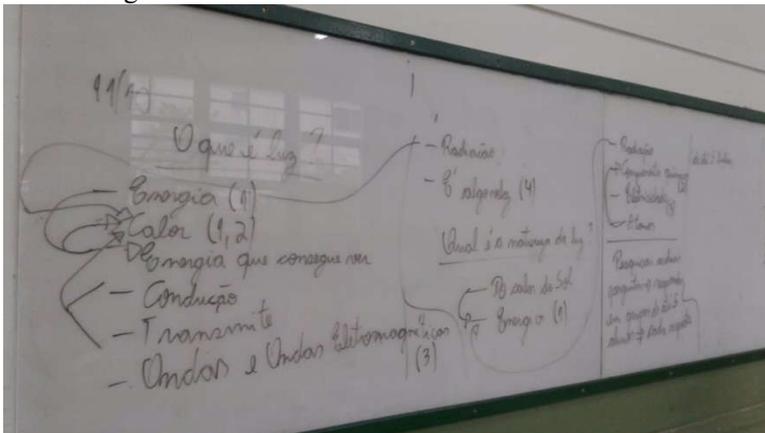


Figura 16. Concepções prévias e classificação. Fonte: próprio autor.

Na sequência, o professor dividiu a turma em sete grupos de no máximo cinco alunos na turma 2° 2 e em cinco grupos na turma 2° 6. Foi solicitado aos alunos que pesquisassem em livros e/ou internet respostas para essas perguntas. Imediatamente os alunos pesquisaram em seus *smartphones* as respostas, apesar do professor ter levado livros didáticos. Há de notar que, com exceção de um grupo de alunos da turma 2° 2 que pesquisou em livros, todos os outros grupos utilizaram apenas a internet. Os alunos procuraram descrever suas respostas em no máximo 10 linhas. Essa atividade foi entregue ao professor. As respostas fornecidas para a primeira pergunta estão organizadas nos quadros 2 e 3. Já os quadros 4 e 5 exibem as respostas para a segunda pergunta.

Respostas	Número de grupos
Onda eletromagnética	6
Partícula	1
Pacotes de energia (Fótons)	0
Comprimento de onda	2

Raios visuais	0
Radiação	5
Radiação “visível”	2
Clareza/Clareza (Concepção alternativa)	2

Quadro 2: Classificação das respostas sobre: “O que é Luz?” após consulta em livros e internet. Turma 2^o2

Respostas	Número de grupos
Onda eletromagnética	0
Partícula	1
Pacotes de energia (Fótons)	2
Raios visuais	1
Radiação	1
Radiação “visível”	0
Clareza/Clareza (Concepção alternativa)	2

Quadro 3: Classificação das respostas sobre: “O que é Luz?” após consulta em livros e internet. Turma 2^o6

Respostas	Número de grupos
Partículas e/ou pequenas partículas	5
Ondas Eletromagnéticas e/ou Radiação	7
Fótons	0
Outra resposta	1

Quadro 4: Classificação das respostas sobre: “Qual a natureza da luz?” após consulta em livros e internet. Turma 2^o2

Respostas	Número de grupos
Partículas e/ou pequenas partículas	2
Ondas Eletromagnéticas e/ou Radiação	1
Fótons	1

Outra resposta	2
----------------	---

Quadro 5: Classificação das respostas sobre: “Qual a natureza da luz?” após consulta em livros e internet. Turma 2°6

3.2.1. 2ª aula

Na aula seguinte o professor iniciou a problematização comparando as respostas dos alunos, buscando semelhanças e/ou diferenças entre ela. O objetivo desta etapa inicial foi promover o debate sobre as diferentes respostas. O professor se manteve sem dizer qual resposta era mais apropriada.

Após esse momento e com a pergunta ainda sem uma resposta, o professor pediu para que os alunos fizessem a leitura de um texto (SANTOS, 2017) que reforça a concepção corpuscular de Isaac Newton. Logo após, foi assistido um vídeo nessa mesma temática (TVO, 1984). O vídeo tinha como característica de mostrar diversos pontos da ótica de Newton, principalmente onde essa formulação estava correta.

Na sequência, o professor pediu para que os alunos respondessem se a luz se propaga em linha reta. No final dessa aula os alunos entregaram suas respostas. Na turma 2°2, 7 grupos de alunos responderam à essa questão, na turma 2°6 4 grupos. As respostas podem ser classificadas em três quadros para a turma 2°2, um com a resposta (Quadro 6) e a seguinte com o argumento usado para reforçar essa resposta “Sim” (Quadro 7), e outro para argumentar o “Sim, com alguma exceção” (Quadro 8). Na turma 2° 6 forma utilizados apenas dois quadros, um com a resposta (Quadro 9) e outro com os argumentos usados (Quadro 10).

Respostas	Número de grupos
Sim	4
Não	0
Sim, com alguma exceção	3

Quadro 6: Classificação das respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Turma 2°2

Argumentos usados	
Fótons	0
Eclipse, Sombras	2
Feixe de luz	2
Câmara escura	1

Refração da luz	0
-----------------	---

Quadro 7: Classificação das respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Sim. Turma 2^o

Argumentos usados	
Fótons	1
Eclipse, Sombras	0
Feixe de luz	0
Câmara escura	0
Refração da luz	2

Quadro 8: Classificação dos argumentos fornecidos nas respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Não. Turma 2^o

Respostas	Número de grupos
Sim	4
Não	0
Sim, com alguma exceção	0

Quadro 9: Classificação das respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Turma 2^o

Argumentos usados	
Fótons	0
Eclipse, Sombras	3
Feixe de luz	2
Câmara escura	0
Refração da luz	0

Quadro 10: Classificação dos argumentos fornecidos as respostas sobre: A luz se propaga em linha reta? Turma 2^o

Nota-se que a grande maioria dos alunos concordou que a luz se desloca em linha reta, usado argumentos diversos para isso. Há de ressaltar que na turma do 2^o a refração da luz foi usada como um argumento contrário para algumas situações.

3.2.3. 3^a aula

O professor começou essa aula lendo as respostas e problematizando com os alunos se a luz se propagava em linha reta ou

não. Após ler as respostas dos alunos o professor perguntou a eles se isso realmente poderia acontecer. A maioria dos alunos das turmas concordou. O professor reforçou que a Ótica de Newton estava correta nos aspectos vistos na aula passada no vídeo e no texto.

Na segunda parte da aula, o professor distribuiu utensílios domésticos como ralador de queijo, descascador de legumes e/ou batatas, boleador, entre outros, pedindo para que os alunos incidissem luz de um laser sobre o menor orifício que esses objetos apresentavam e verificassem a propagação da luz.



Figura 17: Utensílio doméstico: boleador. Fonte: próprio autor.

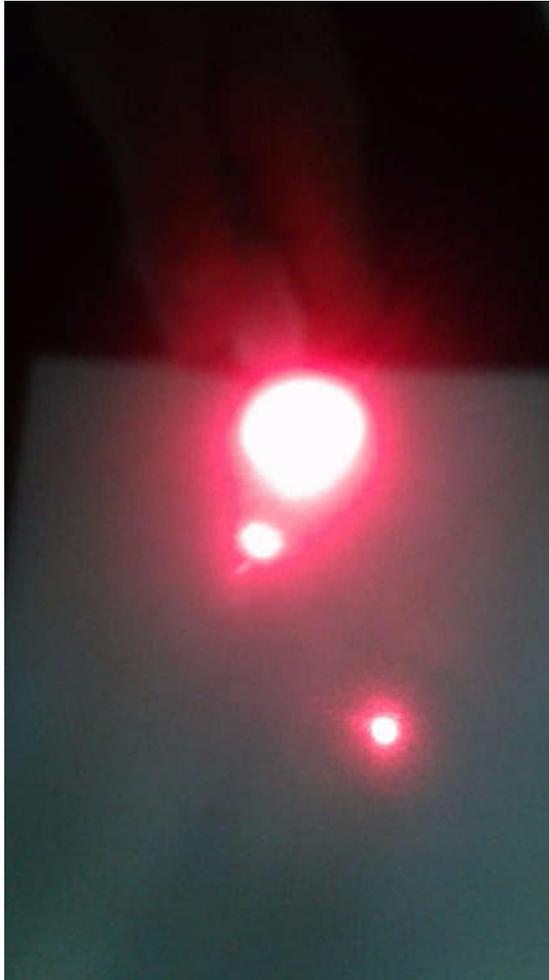


Figura 18: Luz passando pelo boleador (Região iluminada em cima) atingindo uma folha branca de papel sobre a carteira. Fonte: próprio autor.

Visto isso, a maior parte dos alunos relataram que a luz passava de forma retilínea. O objetivo era fazer a luz passar por pequenas fendas para verificar se a luz propagava em linha reta ou não.

Na parte final desta aula os alunos foram instruídos a realizar a primeira atividade experimental. Esta atividade consiste na passagem de luz de laser por um CD sem a película de tinta (Anexo B). O intuito

desta atividade foi confrontar a concepção da trajetória retilínea da luz adotada no modelo corpuscular. Seguindo o roteiro, eles fixaram uma folha na parede e incidiram laser sobre o CD, medindo a distância entre os pontos observados. Foi sugerido utilizar uma distância de 10 centímetros entre o CD e a folha.

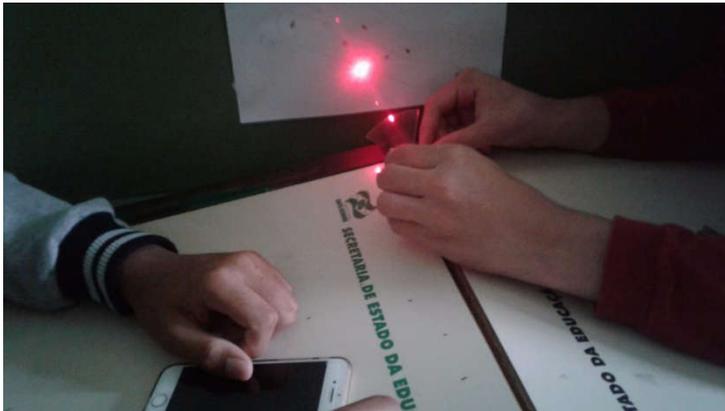


Figura 19: Difração da luz usando CD turma 2º2. Fonte: próprio autor.



Figura 20: Difração da luz usando CD turma 2º6. Fonte: próprio autor.

Os alunos ficaram surpresos com o aparecimento dos “três” pontos iluminados. Um dos grupos da turma do 2º 6 encontrou “cinco” pontos. É interessante notar que nesta escola há cortinas *black out* nas salas de aula, facilitando experiências de ótica. Os alunos nesta aula responderam às questões:

1-Ao passar a luz do laser sem o cd o que é verificado no anteparo?

2-Represente com um desenho a passagem da luz pelo espaçamento constituído pelas trilhas do CD.

3-O que é de se esperar se mudamos a cor luz do laser que incide sobre o CD? Justifique.

Com relação à primeira pergunta, os grupos foram unânimes na resposta: “Somente um ponto que aparece”. Em relação aos desenhos solicitados, temos um exemplos na Figura 21: .

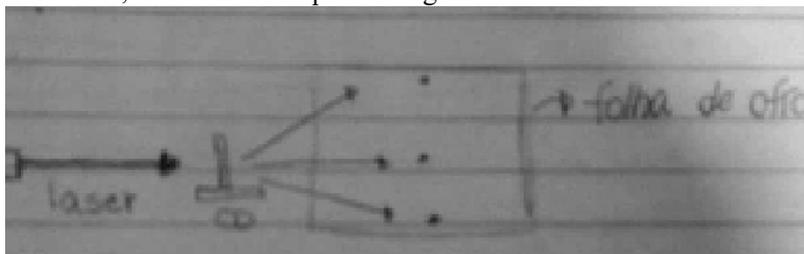


Figura 21: Desenho da passagem da luz pelo espaçamento constituído pelas trilhas do CD.Fonte: próprio autor.

Em relação à última pergunta, podemos classificar as respostas da seguinte forma:

Resposta	Quantidade de grupos
Mais de três pontos	1
Mudança na posição dos pontos	1
Não muda em nada	3

Quadro 11: Resposta à pergunta: O que é de se esperar se mudamos a cor luz do laser que incide sobre o CD? Turma 2º6

Resposta	Quantidade de grupos
Mais de três pontos	1
Mudança na posição dos pontos	3
Não muda em nada	0

Quadro 12: Resposta à pergunta: O que é de se esperar se mudamos a cor luz do laser que incide sobre o CD? Turma 2º6

3.2.4. 4ª Aula

Nesta aula, o professor iniciou problematizando o que foi feito na aula passada, explicando que a luz se comportou de maneira ondulatória no experimento da última aula, iniciando pela grade de difração do CD, pela comparação das frentes de onda na água até o exemplo da dupla fenda de Young (Seção 2.1), e mostrando a razão esta de aparecer mais de um ponto iluminado no anteparo. Também o professor explicou a respeito do processo de gravação do CD que ocorre em trilhas de gravação e a luz passado por entre essas trilhas sofre o efeito de difração, se comportando como onda. É possível observar na Figura 22 a medida de distância entre os pontos iluminados feitos na aula 4.



Figura 22: Marcação dos pontos iluminados devido a passagem da luz pelo CD devido ao efeito da Difração. Fonte: próprio autor

Com estas medidas, os alunos calcularam a distância entre as linhas de difração em um CD, utilizando a equação a seguir:

$$d \sin\theta = m\lambda \quad (2)$$

Onde:

$m = \pm 1$

d = distância entre o ponto central e o ponto do lado esquerdo (ou direito)

θ = ângulo de difração

λ = comprimento de onda da luz,

Na imagem a seguir têm-se as linhas de gravação de um CD “virgem” feita por um microscópio de força atômica com escala de $10 \mu\text{m}$. A luz do laser ao passar por entre essas linhas sofre difração. E na próxima imagem tem-se um CD já gravado com regiões “queimadas” que são escuras e outras onde não houve “queima” clara, respectivamente para representar um código binário. Essas imagens foram mostradas na aula 6 para reforçar e ampliar todo o aprendizado durante o desenvolvido desta sequência.

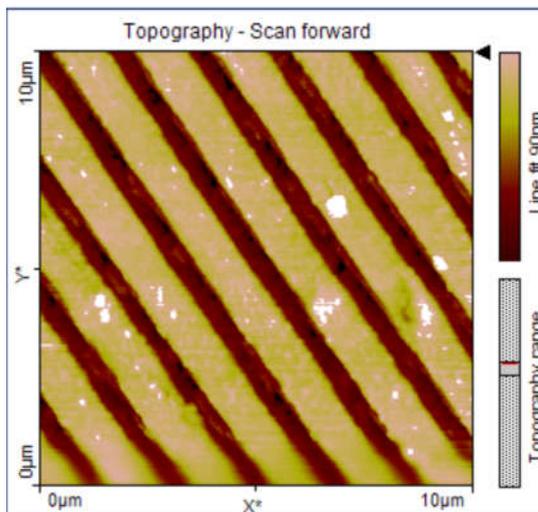


Figura 23: linhas de gravação de um CD “virgem” feita por um microscópio de força atômica com escala de 10 μm . Fonte: (BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS, 2009)

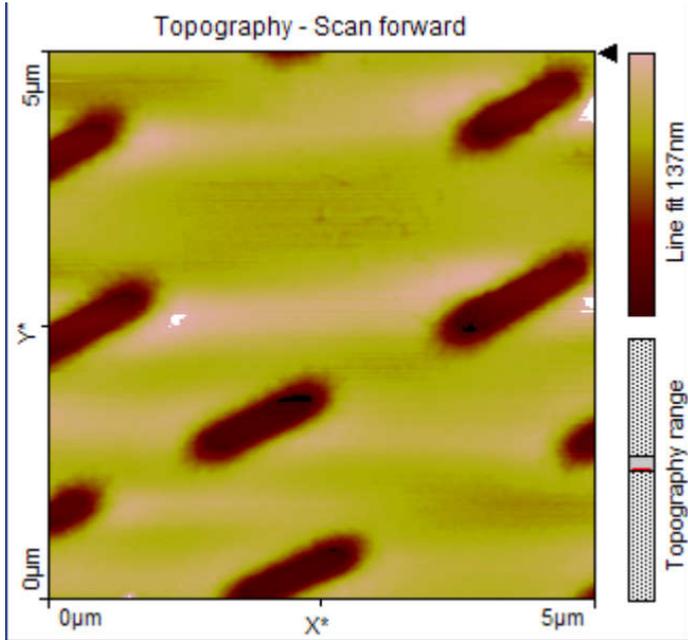


Figura 24: CD já gravado feita por um microscópio de força atômica com escala de 5 μm com regiões “queimadas” que são mais escuras e outras onde não houve “queima” que estão mais claras, respectivamente para representar um código binário. Fonte: (BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS, 2009)

Com relação aos resultados dos cálculos obtidos temos seguintes quadros:

Grupo	Medida (μm)
1	1,75
2	1,5
3	1,48
4	1,70
5	1,75
Valor médio	1,64
Valor real	1,57

Quadro 13: Valores obtidos da separação das linhas de gravação em um Cd. Turma 2º2

Grupo	Medida (µm)
1	1,47
2	1,41
3	1,48
4	1,5
Valor médio	1,46
Valor real	1,57

Quadro 14: Valores obtidos da separação das linhas de gravação em um Cd. Turma 2º6

É interessante relatar que na turma 2º 6 houveram mais dificuldades com relação ao cálculo, em que o professor por várias vezes procurou ajudá-los, e até resolver por completo o cálculo no quadro como exemplo. Houve grupos que refizeram as medidas com base no experimento tentando se aproximar do valor do exemplo, razão esta para seus valores serem tão próximos aos reais em relação a turma 2º2.

3.2.5. 5ª aula

Na 6ª aula o professor problematizou o que ocorreu na aula passada mostrando que a luz nestes experimentos vistos se comportava de maneira ondulatória em contradição com o que predizia Newton que tinha sua teoria baseada no modelo corpuscular de Newton. Uma questão abordada nesta aula era se Newton realmente estava errado. Os alunos em geral falaram que sim, vendo as experiências realizadas, porém há sempre aqueles defendendo que alguns conceitos a ótica newtoniana explicava de maneira correta. Ao conduzir esta última atividade o professor motivo-a como mais teste para verificar se Newton realmente estava errado. A atividade experimental consiste em incidir luz de lasers de várias cores, a saber: vermelho, verde e violeta, além de luz branca de lanterna de celular (Anexo B). O objetivo é medir a voltagem com um multímetro quando o led é exposto a estes diferentes tipos de lasers e luz branca. Há de se ressaltar que os dois lasers verde tinham maior intensidade de luz.

Os resultados obtidos foram que todos os grupos das duas salas de aulas concluíram que a maior medida de voltagem se dava quando se incidia luz violeta sobre o LED.

3.2.6. 6ª aula

Nesta aula o professor iniciou problematizando, primeiramente o que ocorreu na última aula, mostrando que na verdade os alunos viram o efeito fotoelétrico, da luz se comportando como partícula ao incidir sobre a matéria e deixando a dúvida ainda de qual modelo estava correto para a luz. Para reforçar as explicações o professor apresentou o simulador do site *Phet Colorado* sobre Efeito fotoelétrico (Phet, 2017) conforme Figura a seguir, onde mostra que efeito fotoelétrico ocorrendo para os menores comprimentos de onda como violeta e cessando para maiores como o vermelho.

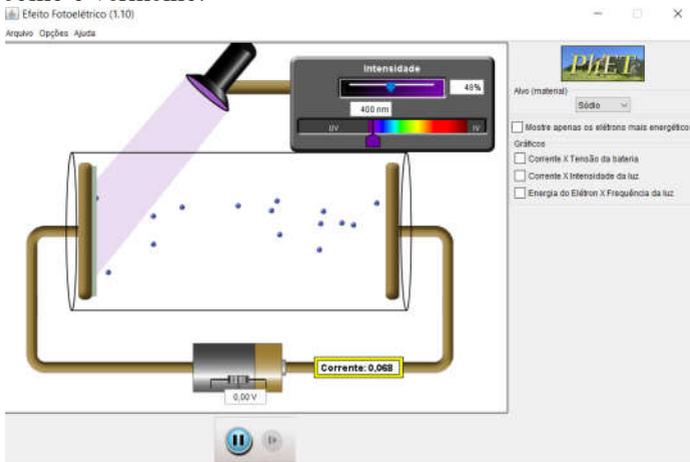


Figura 25: Simulador do Efeito fotoelétrico Fonte: (PHET, 2017)

Com relação aos aspectos ondulatórios vistos na aula 3 e 4 o professor explicou com base nas Figuras apresentadas no artigo sobre este experimento, principalmente no que diz respeito as linhas de gravação de um Cd (BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS, 2009), como visto nas imagens da aula 4.

Na turma 2º2 os alunos pediram para que o professor explicasse mais sobre o espectro eletromagnético, além da luz visível, principalmente no que diz respeito a radiação ultra-violeta, radiações ionizantes (α , β , γ). Como havia tempo o professor explicou sobre esses assuntos, visto que havia relação com a luz. Isso foi repetido para turma

2º 6 que também pediu enfocando, além do que foi citado nas micro-ondas.

Ao concluir esta aula o professor deixou claro que a luz se comporta como onda e partícula ao mesmo tempo e o efeito fotoelétrico é uma das formas de afirmar esse conceito.

3.2.7. 7ª aula

Na 7ª aula o professor fez com que os alunos resolvessem uma lista de exercícios com questões referentes à luz. Esta atividade não foi recolhida, pois na sequência foi corrigida, dando subsídio a Prova bimestral que é feita nesta escola. Ao final dessa aula foi feita uma avaliação sobre a aplicação da sequência utilizando as perguntas: O que vocês aprenderam no decorrer dessas aulas? Houve variações no conceito de luz no decorrer da História? O que vocês mais gostaram de fazer a realização desta sequência didática? Qual teoria que é aceita: a corpuscular ou a ondulatória? Além da natureza da luz, o que mais vocês aprenderam? Na turma 2º 2 os alunos relataram que aprenderam sua dualidade onda-partícula da luz, que ao final as duas teorias estavam corretas, e que eles não esperavam por isso. Também relataram que gostaram de fazer, principalmente, os experimentos, pois sabiam era muito interessante “aprender com a prática”. E também aprenderam um pouco sobre “radiação” (espectro eletromagnético). Com relação à turma 2º 6 as respostas foram as mesmas em relação a aprendizado, e que 3 alunos já esperavam que as duas teorias estavam certas e os demais responderam da mesma forma que a turma anterior. Acharam “muito legal” os experimentos, inclusive com relatos de que são muito mais interessantes aulas com experimentos. Também aprenderam sobre “radiação” “micro-ondas” (espectro eletromagnético) e ainda, sobre como gravam dados em CD.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da sequência didática Dualidade Onda-Partícula: Uma abordagem para o Ensino Médio possibilitou o Ensino de Física de temas mais atuais para o Ensino Médio, que está mais próximo das tecnologias usadas pelos alunos em comparação com um plano tradicional de Ensino que no cenário mostrado, no máximo seria ensinado Ótica Geométrica. Em um bimestre foi possível o Ensino de tópicos de Ótica Geométrica, de Ótica Ondulatória, de Ondas, e do efeito fotoelétrico que dificilmente seriam abordados em um bimestre, principalmente o último que não é, em geral, abordado no Ensino Médio, haja visto o volume de conteúdos do 2º ano que são Termometria, Calorimetria, Termodinâmica, Ótica e Ondulatória. Esta sequência pode ser utilizado de forma a complementar os livros didáticos e/ou como apoio, podendo ser reproduzida em qualquer lugar do país desde que haja os materiais para os experimentos, mas que logicamente os recursos áudio visuais como multimídia ou Tv pendrive ajudam para mostrar vídeos ou imagens que são complementares as explicações.

Com relação a avaliação das turmas percebeu-se mais interesse nas aulas, bem como mais perguntas e participações visto durante todas as aulas, isso fica mais evidente na última aula, quando as respostas nas duas turmas são unânimes de que gostaram de participar da sequência, bem como relatam que aprenderam no desenvolvimento das atividades.

Outras considerações importantes a serem feitas é que durante a aplicação desta sequência vários alunos de outras turmas desta escola pediram ao professor para aplicar, pelo menos os experimentos, o que ajudou a fortalecer a importância da experimentação no Ensino Médio. Estas atividades experimentais foram aplicadas em outras doze turmas de 2º e 3º ano de Ensino Médio em 2017. No final do ano de 2017 em um evento cultural “Honório EnCena” varias atividade experimentais foram apresentadas na intitulada sala de Ciências, incluindo as que compunham esta sequência. Na semana pedagógica de 2018 foi sugerido e acatado pelo grupo de professores, após perceberem a importância das atividades experimentais, de realizar uma Mostra Científica na escola. Em 10 e 11 de agosto de 2018 foi realizado o Evento Científico “I Honório ExpoScience – Mostra Científica Stephen Hawkiwg” com o autor como um dos responsáveis pelo evento que envolveu mais de setenta por cento dos aluno da escola – algo em torno de setecentos alunos – apresentando experimentos diversos, contando inclusive com banner, em Física, Biologia e Química, com envolvimento de diversos

professores das áreas de Ciências da Natureza, das Artes e Linguagens. Este evento foi visitado por mais de dois mil alunos e público em geral das várias escolas do município de Gaspar. Outro fato importante é o convite para apresentação da sequência didática no Colégio Universitário de Gaspar da rede particular que será feita durante o ano de 2019. Também foi possível estabelecer um espaço para as “Ciências da Natureza” no depósito onde são guardados experimentos e materiais importantes às aulas. Por fim, tudo isso está contribuindo para o aprendizado dos alunos.

Referências

ARTUSO, A. R. WRUBLEWSKI, M. Física, volume 2. Coleção. Curitiba: Editora Positivo. 2013. 320 p.

BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS, R ; K. UsingCdsAndDvds As DiffractionGratings. GeorgiaInstituteof Technology. 2009 Disponível em

http://www.nnin.org/sites/default/files/files/Karen_Rama_USING_CDs_AND_DVDs_AS_DIFFRACTION_GRATINGS_0.pdf Acesso em 10 fev 2019

BELLUCCO, A. E DE CARVALHO, A. M. P. Uma proposta de sequência de ensino investigativa sobre quantidade de movimento, sua conservação e as leis de Newton Cad. Bras. Ens. Fís., v. 31, n. 1, p. 30-59, abr. 2014

BONJORNO, J. R. et al. Física: Coleção. São Paulo: FTD. 2013.

BRASIL, Base Nacional Curricular Comum, 2ª Versão, Ciências da Natureza, p. 136-152. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/documentos/bncc-2versao.revista.pdf>. Acesso em 08 nov. 2016

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais + (PCN+) - Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2002.

BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza (Ensino Médio). Brasília: MEC, 2000.

CARLSON, E. H. Wave-Particle Duality: Light, Michigan StateUniversity, http://www.physnet.org/modules/pdf_modules/m246.pdf ;

DARRIGOL, O. **A History of Optics from Greek Antiquity to the Nineteenth Century**. Oxford: Oxford University Press, 2012. 327 p. ISBN-13: 978-0-19-964437-7.

DR. QUANTUN. Dualidade Onda-Partícula. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ieZjglEM9Ow> Acesso em: 08 ago 2017

EEB PROFESSOR HONÓRIO MIRANDA, Projeto Político Pedagógico 2017. Gaspar-SC, 2017. Arquivo da Escola de Educação Básica Professor Honório Miranda

EISBERG;E. eRESNICK, R. M **Física Quântica**: Átomos, Moléculas, Sólidos e Partículas, Editora Campus, 2010.

FEYNMAN, R. P.**Lições de Física de Feynman** – A Edição Definitiva – 4 Volumes 1ª Ed. 2008 Ed. Bookman ISBN 9788577802593;

FRANCO, H. O Triunfo da Teoria Ondulatória da Luz. Apostila de Evolução dos Conceitos da Física Publicação IFUSP 1336/98; 2a edição 2002 Disponível em: <http://plato.if.usp.br/1-2003/fmt0405d/apostila/oticaonda/index.html>

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER. J. Fundamentos de Física Vol. 4 – Ótica e Física Moderna– 9ªedição 2012 Ed. LTC. ISBN 9788521619062;

IF/UFRGS Experimento da dupla fenda de Young. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/historia/young.html> Acesso em 25 jun 2018

MARQUES, G C ; UETA, N. **Ótica (Básico)**. E-Livros. Disponível em <http://efisica.if.usp.br/optica/basico/refracao/snell/> Acesso em 08 dez. 2018

MÉHEUT, M ; PSILLOS, D (2004)'Teaching-learning sequences: aim sand tools for science education research', International Journal of Science Education, 26:5,515 — 535To link tothisArticle: DOI: 0.1080/09500690310001614762URL:<http://dx.doi.org/10.1080/09500690310001614762>

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica Vol. 4 – Ótica Ótica Relatividade e Física quântica – 2ª Ed. 2014.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica Vol. 4 – Ótica, Relatividade e Física quântica – 1ª Ed. 1998. ISBN 852120163X.

PHET. Efeito fotoelétrico. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric. Acesso em 12 ago 2017 e 10 dez 2018

PIQUEIRA J. R. C. ;CARRON, W. ;GUIMARÃES J. O. S. **Física**, Coleção. 1ª Edição. São Paulo: Ática. 2013.

PIRES, A. S. T. Evolução das Idéias da Física. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011. 478 p. ISBN 9788578611033

SANTA CATARINA, 2014, Proposta Curricular De Santa Catarina, Secretaria de Estado da Educação, (S.N.), 192 p.

SANTOS, M.A. Newton e as cores Disponível em: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/newton-as-cores.htm> Acesso em 12 out 2017

SILVA, C. C. ; MARTINS, R. A. A Teoria Das Cores De Newton: Um Exemplo Do Uso Da História Da Ciência Em Sala De Aula Ciência ; Educação, v. 9, n. 1, p. 53-65, 2003

TOSSATO, C. R. A função do olho humano na óptica do final do século XVI Revista ScientiæSudia, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 415-41, 200. Disponível em <http://www.revistas.usp.br/ss/article/view/11044/12812> Acesso 10 dez 2018

TVO, Dualidade Onda-Particula. Produzido porTV Educativa Pública da província de Ontário, Canadá. Disponível em:<https://www.youtube.com/watch?v=2NuLa29WKnI> Acesso em: 07 ago. 2017

VAUGHAN, M. P. **Optics** UniversityCollege Cork. Disponível em: <http://www.physics.ucc.ie/mVAUGHAN/lecturing/PY3101/Optics.pdf> Acesso em 10 out. 2018

VYGOTSKY, L. S. **A construção do pensamento e da linguagem**.Tradução Paulo Bezerra. São Paulo: Martins Fontes, 2001. 496 p.

VYGOTSKY, L. S. **A Formação Social da Mente**, Lev S. Vygotsky, 90 págs., Ed. Martins Fontes, versão digital. Disponível em:

<http://www.egov.ufsc.br/portal/sites/default/files/vygotsky-a-formac3a7c3a3o-social-da-mente.pdf> Acesso em 10 fev. 2019

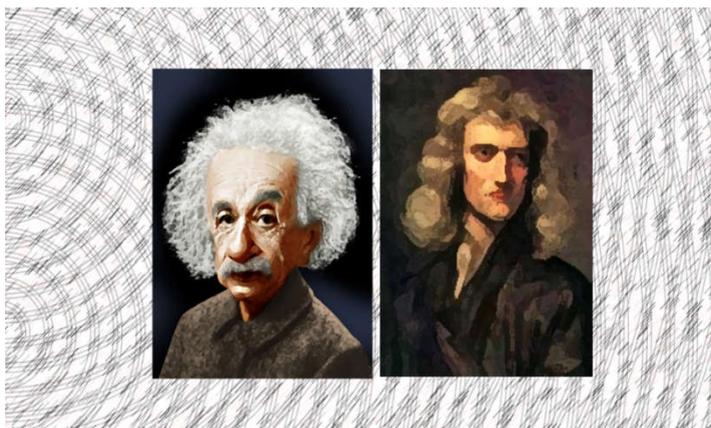
XAVIER, C. ; BENIGNO, B. Física: Aula por Aula: Coleção. São Paulo: FTD. 2013. Coleção.

YOUNG, H;FREEDMAN, R A.,SEARS Física 4, Ótica e Física Moderna, 12^a Ed. 2009, Editora Addison Wesley, ISBN 9788588639355.

ZILLIO,S.C. **Óptica Moderna**, Instituto de Física de São Carlos. USP, 2009, 320 p.ISBN 978-85-88533-42-4

APÊNDICE A – Sequência didática

DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ – UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO



Enio dos Anjos

Blumenau
Fevereiro de 2019

Apresentação

Caro(a) professor(a), esta sequência didática tem por finalidade auxiliar o professor de Física do Ensino Médio na abordagem da dualidade onda-partícula da luz.

Richard Feynman disse uma vez: “a luz não se parece com nada que você já tenha visto” [Feynman, 2008]. Ao fazer esta afirmação, Feynman se referia à um dos fenômenos mais intrigantes e bonitos da natureza: a dualidade onda-partícula da luz.

Embora os diversos fenômenos e aplicações que envolvem a natureza da luz estejam presentes em nosso cotidiano, o ensino de ótica no Ensino Médio ainda é bastante negligenciado. Esta área é abordada geralmente após o assunto de Termodinâmica, e é separada, geralmente, pelos tópicos: “Ótica Geométrica” e “Ótica Ondulatória”, sendo que na distribuição didática do Ensino Médio, reserva-se geralmente apenas um bimestre para o ensino de Ótica. Ressalta-se ainda que natureza dual da luz é considerada como um tópico opcional no atual ensino de ótica para o Ensino Médio, e é raramente abordada. Isto significa que nossos estudantes aprendem ótica sem ao menos conhecer natureza de seu objeto de estudo.

Esta sequência didática é parte integrante da dissertação de mestrado do programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MPEF) da UFSC, Campus Blumenau, intitulada: “Dualidade Onda-Partícula Da Luz: Uma Abordagem Para O Ensino Médio” e sob orientação da Profa. Dra. Lara Fernandes dos Santos Lavelli. Sua construção foi norteadada pela teoria sócio

interacionista de Lev Vygostky [Vygostsky, 2000 & 2001], de artigos sobre sequências didáticas [Bellucco e Carvalho, 2014 & Méheut e Psillos, 2004] buscando ser uma sequência lógica de ensino dos modelos corpuscular e ondulatório da luz, abordando conceitos como propagação retilínea, propriedades ondulatórias da luz, difração da luz, efeito fotoelétrico, entre outros, bem como atendendo aos principais documentos que embasam a educação em nosso País [Brasil, 2000; 2002 & 2016] e diretrizes estaduais [Santa Catarina, 2014]. Para a aplicação integral desta sequência deve-se reservar no mínimo 6 momentos, que são na verdade 7 aulas, que incluem experimentos de exploração do fenômeno de difração da luz e do efeito fotoelétrico.

Para auxiliá-lo nesta jornada, trazemos nas próximas páginas uma breve revisão dos conceitos científicos envolvidos no trabalho sob uma perspectiva histórica. Além da sequência didática, você poderá encontrar as sugestões de roteiros dos experimentos em anexo, textos a serem utilizados com seus estudantes e links para vídeos. Bons estudos e bom trabalho!

Sumário

Apresentação	71
1. Revisão Bibliográfica	79
1.1. Dualidade onda-partícula da luz: uma visão histórica	79
1.1.1 Antigos gregos: fenômenos sobrenaturais, atomistas e fogo visual	79
1.1.2. Contribuições de Galileu e Descartes	80
1.1.3. Huygens e Hooke: os princípios da ótica ondulatória.....	82
1.1.4. Isaac Newton e a teoria corpuscular da luz	84
1.1.5. Fresnel e Young: contribuições a teoria ondulatória da luz	86
1.1.6. Contribuições do Eletromagnetismo: Faraday e Maxwell .	88
1.1.7. Efeito fotoelétrico: Hertz e Einstein.....	89
2. Sequência didática: Dualidade onda partícula da luz-uma abordagem para o Ensino Médio	93
2.1 Pré aplicação da sequência didática e recursos didáticos:.....	96
2.1.1. Pré aplicação da sequência didática	96
2.1.2. Recursos didáticos	96
2.2 1ª AULA	97
Objetivo:	97
2.2.2 Problematização inicial:.....	97
2.2.3. Procedimentos metodológicos	98
2.2.4. Avaliação:	100

2.3. 2ª AULA.....	100
2.3.1. Objetivo:.....	100
2.3.2 Problematização inicial:.....	100
2.3.3. Procedimentos metodológicos	101
2.3.4. Avaliação:.....	102
2.4. 3ª AULA.....	102
2.4.1. Objetivo:.....	103
2.4.2. Problematização inicial:.....	103
2.4.3. Procedimentos metodológicos	103
2.4.4. Avaliação:.....	105
2.5. 4ª AULA.....	105
2.5.1 Objetivo:.....	105
2.5.2. Problematização inicial:.....	106
2.5.3. Procedimentos metodológicos	106
2.5.4. Avaliação:.....	107
2.6. 5ª AULA.....	107
2.6.1. Objetivo:.....	107
2.6.2. Problematização inicial:.....	107
2.6.3. Procedimentos metodológicos	107
2.6.4. Avaliação:.....	108
2.7. 6ª AULA.....	109

2.7.1. Objetivo:.....	109
2.7.2. Problematização inicial:.....	109
2.7.3. Procedimentos metodológicos	109
2.7.4. Avaliação:	112
2.8. 7ª AULA	112
2.8.1. Objetivo:.....	112
2.8.2. Problematização inicial:.....	112
2.8.3. Procedimentos metodológicos	112
2.8.4. Avaliação:	113
2.9. Avaliação da sequência didática	114
3. REFERÊNCIAS:.....	114

Índice de Figuras:

Figura 1: Ilustração de um olho emitindo raios visuais. Fonte: [Tossato, 2005].	80
Figura 2: Diagrama esquemático da luz incidindo na interface entre um meio menos refringente ($n = n_1$) para um meio mais refringente ($n = n_2$). Fonte: [Marques & Ueta, 2007].	82
Figura 3. Difração segundo o princípio de Huygens com frentes de onda. Fonte: [Lavarda, 2018].	83
Figura 5. Fotografia da Figura de difração produzida por um disco. Nota-se que ao centro existe um ponto iluminado. Fonte: [Halliday, 2012].	86
Figura 6: Representação do experimento de dupla fenda de Young com as respectivas interferência construtiva. Fonte: [Wikipédia 2, 2018].	87
Figura 7. Experimento de Faraday onde a luz entra polarizada em E e ao atravessar um vidro grosso envolve em um eletroímã que produz uma campo magnético B e ao incidir sobre o anteparo sofre uma desvio de ângulo β em sua polarização original. Fonte: [Wikipedia 3, 2018].	88
Figura 8. Experimento de Hertz: nos dois eletrodos que estão entre a e b são geradas grandes descargas elétricas, transmitindo por meio de ondas eletromagnéticas para outros dois eletrodos que estão em C. Fonte: [Mangili, 2012].	90
Figura 9. Aparelho usado para medir o efeito fotoelétrico Fonte: [Eisberg, 2010].	91
Figura 10. Concepções prévias e classificação. Fonte: próprio autor.	98

Figura 11: Utensílio doméstico: boleador. Fonte: próprio autor.	104
Figura 12: Difração da luz usando CD em uma turma de Ensino Médio. Fonte: próprio autor.....	104
Figura 13. Efeito Fotoelétrico em um metal onde são incididos a luz vermelha (a esquerda), luz verde (centro) e luz violeta (a direita), mostrando que os elétrons são arrancados com maior velocidade (energia cinética) quando está sujeito a luz violeta [Khan Academy, 2018]	110
Figura 14: Simulador do Efeito Fotoelétrico Fonte: [PHET, 2017]	111

Índice de Quadros:

Quadro 1: Distribuição das aulas que compõe a sequência didática, seus respectivos procedimentos metodológicos e objetivos.....	95
--	----

1. Revisão Bibliográfica

1.1. *Dualidade onda-partícula da luz: uma visão histórica*

Fenômenos óticos como sombras, reflexão da luz, arco-íris sempre fascinaram a humanidade desde seus primórdios. Possíveis explicações a esses fenômenos também surgiram no decorrer da história. A seguir serão mostradas as principais concepções a respeito da luz de uma forma histórica, juntamente com os conceitos mais importantes.

1.1.1 *Antigos gregos: fenômenos sobrenaturais, atomistas e fogo visual*

Os primeiros registros a respeito da Ótica foram dos antigos gregos que a descreveram entre os fenômenos naturais observados e, posteriormente, influenciaram a civilização Ocidental. No século VI a.C. alguns gregos começaram a procurar compreender os fenômenos naturais buscando essas explicações em forças da natureza. Leucipo e Demócrito, como os primeiros atomistas buscaram explicar os fenômenos naturais através de átomos de diversos tamanhos. Contemporânea a essas primeiras teorias, existia uma visão popular de um “fogo” sendo emitido pelos olhos como raios visuais [Darrigol, 2012]. Demócrito acreditava na sua interpretação atomista somando a do fogo visual. Epicuro e Lucrecio, que eram seguidores de Demócrito, abandonaram a crença no fogo visual e passaram a imaginar camadas finas de átomos que viajavam desde o objeto até os olhos como escrito no livro *De rerum* e, para tanto era

necessária a luz do sol para ver os objetos. Este livro foi escrito no século I a.C.

Outro marco importante na história da Ótica é o livro Óptica de Euclides, que foi escrito por volta de 300 a.C. Neste livro Euclides trata a luz com ferramentas de descrição geométrica. Para esse filósofo, a luz viajava de forma geométrica, onde os olhos seriam vértices e emitiam cones visuais [Vaughan, 2014], conforme ilustrado na Figura 1.

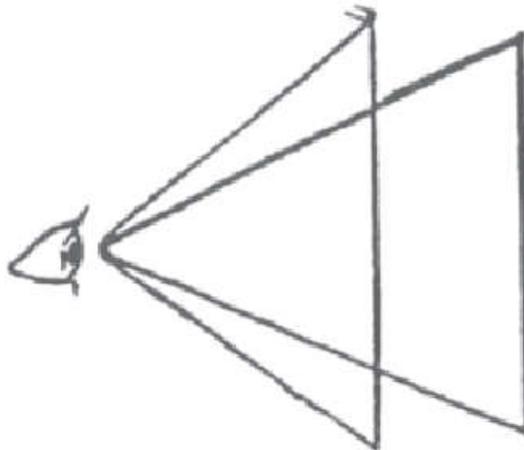


Figura 1: Ilustração de um olho emitindo raios visuais. Fonte: [Tossato, 2005].

1.1.2. Contribuições de Galileu e Descartes

Um pouco adiante, entre os séculos XV e XVII, período compreendido pelo Iluminismo, houve o surgimento de muitos pensadores que contribuiriam para a atual compreensão do

mundo e da Ótica. Dentre eles podemos destacar, Galileu e Descartes.

Embora Galileu não tenha inventado o telescópio, o aperfeiçoou fabricando melhores lentes, otimizando assim o poder de ampliação desse instrumento em nove vezes [Vaughan, 2014]. Como esse instrumento, Galileu observou as fases de Vênus, as manchas solares e descobrir as quatro maiores luas de Júpiter, conhecida também como luas galileanas. Já René Descartes obteve de forma independente a lei para a refração da Luz, conhecida atualmente como Lei de Snell-Descartes, referindo-se também a Willebrord Snellius. Essa lei relaciona os ângulos de incidência Θ_1 e de refração Θ_2 da luz em relação à normal da interface entre dois meios com seus respectivos índices de refração, n_1 e n_2 . Pode-se enunciá-la como: “Numa refração, o produto do índice de refração do meio no qual ele se propaga pelo seno do ângulo que o raio luminoso faz com a normal é constante” [Marques & Ueta, 2007]. Essa lei foi obtida a partir da abordagem ondulatória da luz e pode ser escrita como

$$n_1 \cdot \text{sen}\theta_1 = n_2 \cdot \text{sen}\theta_2 \text{ (Equação 1)}$$

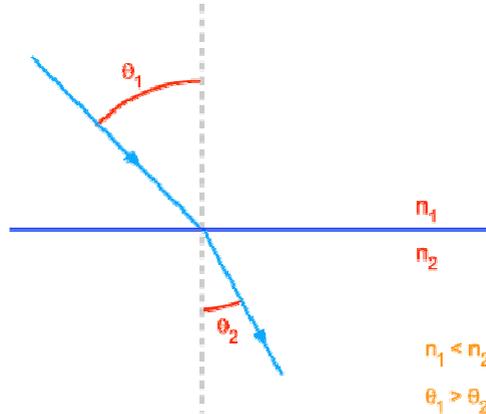


Figura 2: Diagrama esquemático da luz incidindo na interface entre um meio menos refringente ($n = n_1$) para um meio mais refringente ($n = n_2$). Fonte: [Marques & Ueta, 2007]

1.1.3. Huygens e Hooke: os princípios da ótica ondulatória

Outra contribuição muito importante para a Ótica Ondulatória foi dada pelo físico holandês Christiaan Huygens. Huygens afirmou que cada ponto em uma frente de onda deve agir como uma fonte de ondas secundária que, em algum momento posterior, se soma para formar uma nova frente de onda. A Figura 3 ilustra esta ideia, que ficou conhecida como o Princípio de Huygens. Nesta abordagem, Huygens contraria a abordagem corpuscular para a luz e passa a afirmar que a luz possui um caráter ondulatório.

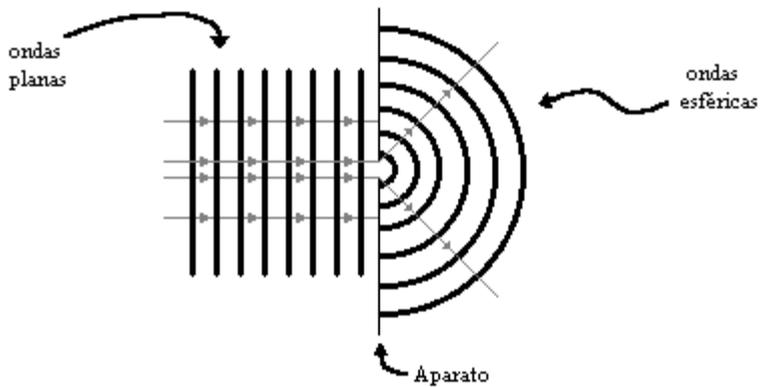


Figura 3. Difração segundo o princípio de Huygens com frentes de onda. Fonte: [Lavarda, 2018]¹⁰

Outro defensor da teoria ondulatória da luz, Robert Hooke afirmava a luz poderia ser compreendida como uma sucessão periódica de pulsos, causados por pequenas e rápidas vibrações da fonte luminosa, viajando em uma velocidade muito alta, porém finita em um meio homogêneo [Darrigol, 2012]. Hooke comparou a luz com a onda sonora nas suas propriedades mais fundamentais. Havia ideias, inclusive nesta época, sobre o Efeito Doppler e de comprimento de onda da luz, principalmente do vermelho e azul.

¹⁰ [Lavarda, 2018] Lavarda, F.C. Experimentos de Física com materiais do dia a dia. Disponível em: <http://www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/opt13.htm>. Acesso em 08 dez. 2018

1.1.4. Isaac Newton e a teoria corpuscular da luz

Apesar de alguns estudos como o de Descartes, Huygens e Hooke da interpretação ondulatória, sir. Isaac Newton preferiu explicar os fenômenos óticos baseado em uma descrição corpuscular. Em 1666, utilizando-se da refração e dispersão em um prisma, Newton conseguiu demonstrar experimentalmente a decomposição da luz branca nas diferentes cores do arco-íris. Na época era possível demonstrar matematicamente este fenômeno em termos da Ótica Ondulatória assumindo que diferentes cores da luz percorrem o meio com velocidades diferentes. Newton, no entanto, não interpretou seus resultados dessa maneira [Vaughan, 2014]. Em seu livro *Ótica*, ele comparou as “partículas” de luz à pequenas esferas, massivas e muito rápidas fornecendo explicações satisfatórias sobre a decomposição espectral da luz branca [Nussenzveig, 2014].

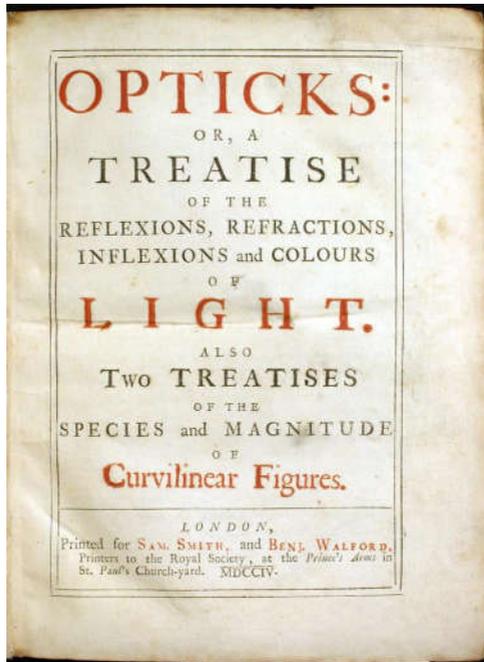


Figura 4: Fotografia da primeira edição do livro Ótica, publicado em 1704 por sir. Isaac Newton. Fonte: [Wikipédia 1, 2018]¹¹

Devido aos aspectos anteriormente explanados e à respeitosa reputação de sir. Isaac Newton, a teoria corpuscular da luz foi aceita por mais de um século. Entretanto, há de ressaltar que Newton não tinha certeza que sua teoria para a luz estava correta e existiam aspectos dos quais a teoria newtoniana não explicava, como a aberração cromática, que só poderia ser explicada pela teoria ondulatória da luz.

11 [Wikipédia 1, 2018] Wikipedia, *Opticks*. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Opticks> Acesso em 08 ago. 2018

1.1.5. Fresnel e Young: contribuições a teoria ondulatória da luz

Mesmo quase um século após a morte de Isaac Newton, a teoria corpuscular da luz exercia influência muito grande. Isto ficou evidente na dificuldade da comunidade científica em aceitar a explicação do fenômeno de difração da luz, como o que ocorreu em 1818, com Augustin-Jean Fresnel. Ao observar a aparição de um ponto brilhante na sombra de um disco iluminado, conforme ilustra a Figura 5, Fresnel submeteu um artigo à Academia Francesa de Ciências, explicando este fenômeno a partir da abordagem da ótica ondulatória.



Figura 5.Fotografia da Figura de difração produzida por um disco. Nota-se que ao centro existe um ponto iluminado. Fonte: [Halliday, 2012]

Embora seja um marco importante no desenvolvimento da ótica ondulatória, o trabalho de Fresnel aconteceu um pouco antes do famoso experimento de fendas duplas, realizado por Thomas Young em 1803. Esse experimento consistiu na passagem de luz por duas pequenas fendas, demonstrando que a projeção observada em um anteparo é de franjas claras alternado com escuras, chamadas também de interferência

construtiva e destrutiva da luz, respectivamente. Um diagrama esquemático deste experimento está ilustrado na Figura 6.

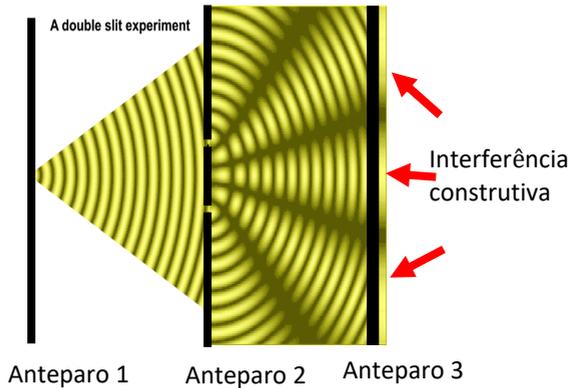


Figura 6: Representação do experimento de dupla fenda de Young com as respectivas interferência construtiva. Fonte: [Wikipédia 2, 2018]¹²

A equação obtida na época relacionava o tamanho da abertura da fenda (d), com o comprimento de onda (λ) da luz e a ordem da interferência (m) da região de máximo:

$$d \cdot \text{sen}\theta = m \cdot \lambda \text{ (Equação 2)}$$

O experimento de dupla fenda de Young consistiu na primeira evidência conclusiva da natureza ondulatória da luz. No entanto, haviam ainda dúvidas a respeito da natureza da luz.

12 [Wikipédia 2, 2018] Wikipedia. A Double slit experiment. Disponível em: Acesso em 10 ago. 2018

1.1.6. Contribuições do Eletromagnetismo: Faraday e Maxwell

Contemporâneo a Young, Michael Faraday que realizou o experimento onde fez passar luz por um vidro “grosso” envolto em um eletroímã conseguiu mudar a polarização da luz, mostrando suas características eletromagnéticas, conforme ilustra a Figura a seguir:

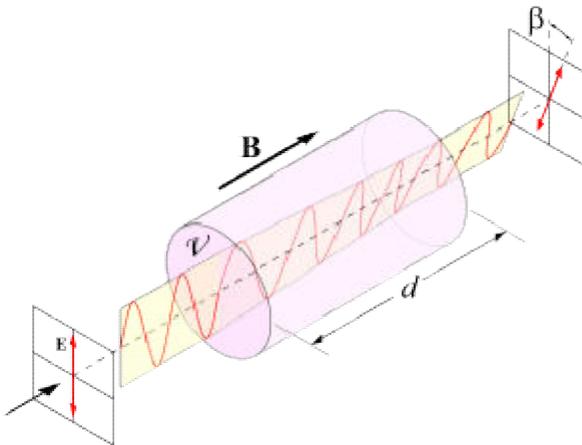


Figura 7. Experimento de Faraday onde a luz entra polarizada em E e ao atravessar um vidro grosso envolto em um eletroímã que produz um campo magnético B e ao incidir sobre o anteparo sofre um desvio de ângulo β em sua polarização original. Fonte: [Wikipedia 3, 2018]¹³.

Inspirado pelos resultados experimentais de Faraday, James Clerk Maxwell (1831 - 1879) foi capaz de prever matematicamente a existência das ondas eletromagnéticas. A velocidade dessas ondas poderia ser calculada a partir de

¹³ [Wikipedia 3, 2018] Wikipedia Efeito Faraday Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Faraday Acesso em 12 dez 2018

constantes universais fundamentais: a permissividade do vácuo ϵ_0 e a permeabilidade magnética do vácuo μ_0 ,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \text{ (Equação 3).}$$

Quando Maxwell calculou esse valor, ele descobriu que essa velocidade era a mesma que a velocidade medida para a luz, concluindo que, de fato, a luz é uma forma de radiação eletromagnética.

1.1.7. Efeito fotoelétrico: Hertz e Einstein

Procurando comprovar as previsões de Maxwell, Henrich Hertz construiu um gerador de ondas eletromagnéticas, em 1887. Uma vez que ondas eletromagnéticas são geradas por cargas aceleradas, o experimento de Hertz consistia em grandes descargas elétricas entre dois eletrodos, que era transmitido para outros eletrodos que não estavam ligados aos primeiros, conforme esquematizado na Figura 8.

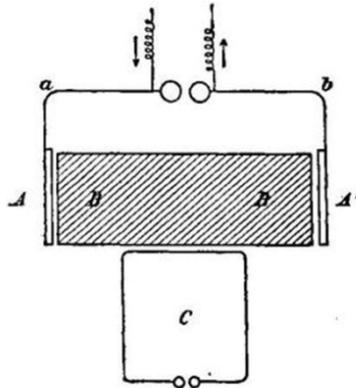


Figura 8. Experimento de Hertz: nos dois eletrodos que estão entre a e b são geradas grandes descargas elétricas, transmitindo por meio de ondas eletromagnéticas para outros dois eletrodos que estão em C. Fonte: [Mangili, 2012]¹⁴

Hertz percebeu que essas descargas elétricas eram facilitadas conforme incidia luz sobre esses eletrodos geradores. Hertz acabou descobrindo, nesse momento as ondas de rádio, que tem comprimento de onda λ muito maior que a radiação visível [Pires, 2011]. Porém não formalizou seus conhecimentos a respeito do efeito fotoelétrico.

Quando estudava ondas eletromagnéticas, Hertz percebeu que as faíscas entre os eletrodos aparentavam maior intensidade quando iluminadas por luz ultravioleta. Esta foi a primeira demonstração do efeito fotoelétrico muitas vezes atribuído erroneamente a Einstein [Nussenzveig, 2014].

14MANGILI, A. I. **Heinrich Rudolph Hertz e a “descoberta” do efeito fotoelétrico: Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula.** Ciência e Ensino Volume 6, 2012 – pp. 32-48

Pouco tempo após os experimentos de Hertz, Albert Einstein, utilizou um aparelho que consistia de dois eletrodos, A e B, no interior de um invólucro de vidro. Ao incidir luz no eletrodo A elétrons eram ejetados e podiam ser detectados ao atingirem o eletrodo B através de galvanômetro conforme, conforme ilustra a Figura 9. Neste experimento, existia também uma chave inversora de polaridade, que poderia ser utilizada para inverter a diferença de potencial. Um fato interessante é que, ao inverter a chave polarizadora, a corrente fotoelétrica não cessa imediatamente, mostrando que esses fotoelétrons são emitidos com alguma energia cinética.

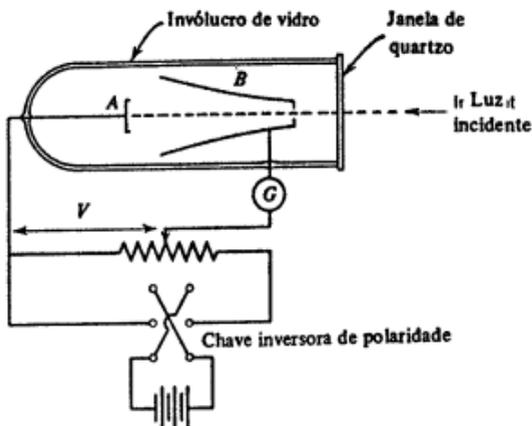


Figura 9. Aparelho usado para medir o efeito fotoelétrico Fonte: [Eisberg, 2010]

Einstein argumentou sobre experiências óticas que eram bem conhecidas na época e que envolviam interferência e

difração da luz, descartando que estas deveriam envolver um grande número de fótons, sendo seus resultados médias do comportamento de fótons individuais [Eisberg, 2010]. Ele mostrou que os fótons emitidos por uma fonte não percorrem sua trajetória como simples partículas clássicas, mas sim como ondas. Porém, sua teoria não descrevia a propagação da luz como apenas “ondas clássicas”, mas como pacotes de energia (E) discretos em que a energia desses pacotes era proporcional à frequência (ν) através da seguinte equação [Eisberg, 2010]:

$$E = h\nu \text{ (Equação 4)}$$

Nesta relação, h é a constante de Planck. Einstein considerou ainda que, quando um elétron é emitido por um metal, sua energia cinética (K) deve ser:

$$K = h\nu - w \text{ (Equação 5)}$$

Sendo w a função trabalho, que é a energia necessária para retirar o elétron desse metal. Dessa forma, Einstein descreveu a luz como sendo um pacote de fótons que pode interagir com a matéria de forma corpuscular, mesmo propagando-se como onda, sendo esta a base da teoria da dualidade onda-partícula da luz.

2. Sequência didática: Dualidade onda partícula da luz-uma abordagem para o Ensino Médio

O quadro 1 resume a maneira com que as aulas que compõe esta sequência didática foram organizadas.

Aula/Momento	Procedimentos Metodológicos	Objetivos
1ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Investigação das concepções prévias sobre a natureza da luz, questionando os alunos - Anotação das respostas no quadro; - Classificação das repostas por meio de suas semelhanças e/ou hierarquias; - Pesquisa na <i>internet</i> e/ou em livros didáticos de Ensino Médio -Atividade em grupo: responder as perguntas: - O que é luz? Qual é sua natureza? 	<ul style="list-style-type: none"> - Evidenciar os conceitos prévios sobre a natureza da luz;
2ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Discussão a partir da leitura das respostas fornecidas pelos grupos de alunos em aula anterior. - Leitura do texto “Ótica Newtoniana” e/ou um vídeo nessa temática - Atividade em grupo: responder à pergunta: - A luz propaga-se em linha reta? 	<ul style="list-style-type: none"> - Promover a discussão dos alunos a sobre a natureza da luz; - Caracterizar a natureza da luz como partícula;
3ª aula	<ul style="list-style-type: none"> - Revisão do modelo corpuscular de Newton para a luz. - Demonstração da 	<ul style="list-style-type: none"> - Observar/verificar o comportament

	<p>passagem da luz por pequenos orifícios, como de um ralador de queijo</p> <ul style="list-style-type: none"> – Realização da primeira atividade experimental: passagem da luz por um CD com a parte refletora descascada – Atividade em grupo: responder as questões do roteiro do experimento sobre a propagação ondulatória da luz; 	o ondulatório da luz;
4ª aula	<ul style="list-style-type: none"> – Revisão e problematização sobre o caráter ondulatório da luz; – Deve-se problematizar com os alunos o que foi observado; – Auxiliar e/ou ensinar a realizar os cálculos do experimento sobre o fenômeno de difração da luz; – Atividade em grupo: cálculos do experimento sobre a difração da luz; 	– Efetuar cálculos em relação ao comportamento do ondulatório da luz;
5ª aula	<ul style="list-style-type: none"> – Revisão e problematização sobre o caráter ondulatório da luz Deve-se problematizar com os alunos o que foi observado e do cálculo realizado; – Revisão e problematização sobre o caráter corpuscular da luz; – Realização do experimento do Efeito Fotoelétrico, incidindo luz de diferentes lasers sobre um LED. – Atividade em grupo: responder as questões do roteiro do experimento sobre a 	– Confrontar a teoria corpuscular (Newton) e ondulatória da luz

	propagação corpuscular da luz e efeito fotoelétrico;	
aula 6 ^a	<ul style="list-style-type: none"> – Revisão e problematização sobre o caráter corpuscular da luz e efeito fotoelétrico verificado na última aula; – Revisão e problematização sobre o caráter ondulatório da luz; – Apresentação de vídeo e/ou simulação na temática – Conclusão de que a luz pode se comportar como onda e partícula ao mesmo tempo. 	<ul style="list-style-type: none"> – Confrontar a teoria ondulatória da luz com a corpuscular e efeito fotoelétrico (Einstein) – Compreender que a luz se comporta como onda e partícula ao mesmo tempo
aula 7 ^a	<ul style="list-style-type: none"> – Verificação da aprendizagem por meio de resolução da lista de exercícios; 	<ul style="list-style-type: none"> – Verificar a aprendizagem dos alunos através da resolução de exercícios sobre a Natureza da Luz presentes no ENEM e vestibulares

Quadro 1: Distribuição das aulas que compõe a sequência didática, seus respectivos procedimentos metodológicos e objetivos

2.1 Pré aplicação da sequência didática e recursos didáticos:

2.1.1. Pré aplicação da sequência didática

Antes de aplicar a sequência, é importante que o professor explique brevemente que o objetivo principal é o estudo da ótica, com enfoque na natureza da luz e que nesse método de ensino, utilizando a sequência de ensino investigativa, deve-se ter atenção nos seguintes pontos:

- Importância, inicial, as concepções prévias dos alunos, para uma posterior formalização do conhecimento pelo professor.
- Etapas de pesquisa; momentos de debates; de construção de modelos (desenhos com explicações) representando o que está sendo aprendido.
- Etapas em que o professor conduzirá uma discussão conceitual, sem necessariamente chegar naquele momento a uma resposta final.

2.1.2. Recursos didáticos

- Computador;
- Projetor multimídia;
- Quadro branco ou quadro verde;
- Canetas para quadro branco ou giz para quadro verde;
- Livro didático;

– Laboratório de Informática;

O uso de computador e projetor multimídia, bem como o laboratório de informática não são fundamentais para o desenvolvimento desta sequência, porém auxilia no desenvolvimento das aulas.

Serão necessários também os materiais para o desenvolvimento dos experimentos. Estes materiais, como as sugestões de roteiros dos experimentos encontram-se nos anexos B, C e D (experimento virtual). Vamos agora à sequência, aula por aula.

2.2 1ª AULA

Objetivo:

Evidenciar conceitos prévios sobre a natureza da luz

2.2.2 Problematização inicial:

Perguntar aos alunos:

- a) O que é luz?
- b) Do que a luz é feita?

Neste momento o professor está indicando o conteúdo que os alunos aprenderão. É importante que o professor instigue aos alunos a responder as perguntas, buscando que eles expressem suas concepções prévias a respeito da luz.

2.2.3. Procedimentos metodológicos

O professor deve:

1. Anotar no quadro as respostas dos alunos fornecidas a cada pergunta (concepções prévias);
2. Buscar semelhanças e/ou hierarquias entres elas (se for possível); conforme o exemplo a seguir;

Observação: Como sugestão o quadro pode ser dividido em quatro partes, sendo duas para as respostas dos alunos as perguntas e as outras duas para classificação;

Exemplo:

-Foram citadas as palavras: Energia, radiação, radiação visível, raios emitidos pelo Sol . Elas podem ser classificadas da seguinte forma:

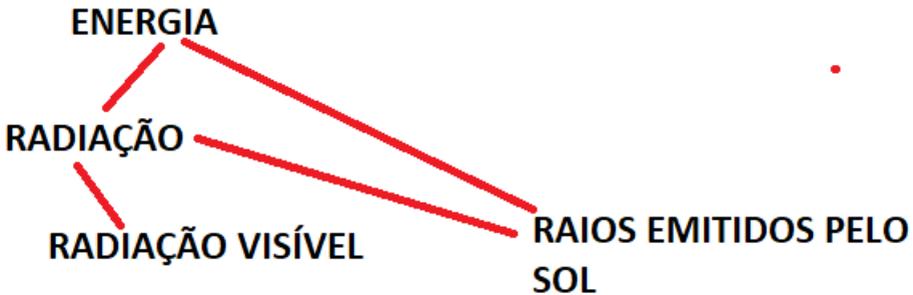


Figura 10. Concepções prévias e classificação. Fonte: próprio autor.

3. Levar os alunos ao laboratório de informática, se possível e for viável, se não pedir para que os mesmos façam isso em sala de aula o item 4;

4. Pedir aos alunos que façam uma pesquisa na Internet (usando o computador na sala de informática, ou seus próprios *smartphones* para esse fim) e em livros didáticos as respostas as perguntas iniciais;

Como sugestões de livros têm-se:

ARTUSO, A. R. WRUBLEWSKI, , M. **Física**, volume 2. 1ª Edição. Curitiba: Editora Positivo. 2013. 320 p.

BONJORNO et al., **Física**, volume 2. 2ª Edição. São Paulo: FTD. 2013. 288 p.

PIQUEIRA J. R. C. CARRON W. e GUIMARÃES J. O. S. **Física**, volume 2. 1ª Edição. São Paulo: Ática. 2013. 312 p.

XAVIER C. BENIGNO B. **Física: Aula Por Aula Física**, volume 2. 2ª Edição. São Paulo: FTD. 2013. 304 p.

Observação: Geralmente o professor recebe várias coleções no período da escolha do livro didático que poderão ser usadas para este fim;

5. Dividir os alunos em grupos de até cinco componentes;

6. Pedir para aos alunos que transcrevam suas respostas em relação a problematização (perguntas) inicial – as respostas devem ser sintetizadas entre 5 a 10 linhas para cada pergunta;

Neste momento é importante a síntese dos alunos em relação às respostas encontradas por eles e suas concepções prévias;

7. Recolher essa atividade de cada grupo, que pode ser a **1ª atividade de caráter somativo**;

Ainda é possível entregá-la na aula seguinte, se for necessário.

2.2.4. Avaliação:

Será considerado satisfatório se os alunos apresentem respostas que condigam com a natureza da luz: ondulatória e/ou corpuscular

2.3. 2ª AULA

2.3.1. Objetivo:

- Promover a discussão dos alunos a sobre a natureza da luz;
- Caracterizar a natureza da luz como partícula;

2.3.2 Problematização inicial:

O professor inicia e/ou continua a aula comparando as respostas, por meio da leitura das respostas prévias dos grupos as perguntas, provocando uma discussão entre grupos.

2.3.3. *Procedimentos metodológicos*

O professor deve:

1. Dividir, inicialmente, a turma em grupos formados na aula anterior;

2. Deve ler as respostas dadas na atividade anterior, buscando semelhanças e/ou diferenças entre esses argumentos, classificando-os;

3. Após a leitura, e classificação, promover o debate entre os grupos, usando perguntas;

Exemplo: - Um grupo definiu a luz como algo relacionado à radiação visível, mas no outro grupo existem citações falando em partículas, será que temos como conciliar essas respostas? E agora tem um grupo falando em raios emitidos pelos olhos? Parecem que essas teorias são bem diferentes ou não?;

Ao final da discussão procurar deixar claro na classificação, as respostas que classificam luz como partícula, onda, onda-partícula, ou concepções alternativas (fogo visual, etc);

4. Distribuir um texto que aborda a Ótica geométrica com base em Isaac Newton (Anexo A);

5. Se houver tempo disponível, ao terminar a leitura sobre o texto, o professor deve apresentar um vídeo curto sobre a Ótica Geométrica;

Como sugestão de vídeo, tem-se Dualidade Onda – Partícula da Luz no que apresenta a respeito de Ótica de Newton [TVO, 1984], somente na primeira parte até 9 minutos e 22 segundos;

Observação: É interessante observar que nesta aula a maior parte dos materiais apresentados aos alunos (texto e vídeo) deixam de forma evidente que Newton está correto em relação à luz como partícula, e essa é a intenção;

6. Pedir para que os alunos, em grupos de até cinco componentes, respondam a seguinte questão: A luz se propaga de forma retilínea?

As respostas devem ser sintetizadas entre 5 a 10 linhas para cada pergunta;

7. Recolher essa atividade de cada grupo, que pode ser a **2ª Atividade De Caráter Somativo**. Ainda é possível entregá-la na aula seguinte se for necessário

2.3.4. Avaliação:

Será considerado satisfatório se os alunos discutam a natureza da luz, com base nas pesquisas feitas na aula anterior e se posicionem sobre a propagação retilínea da luz.

2.4. 3ª AULA

Observação: A atividade completa desse momento se dá em duas aulas: 3ª e 4ª aula, respectivamente.

2.4.1. Objetivo:

- Observar/verificar o comportamento ondulatório da luz;

2.4.2. Problematização inicial:

1. Percebemos que Newton defendia o caráter corpuscular da luz. Quero que vocês observem a luz passando por um objeto que temos aqui em minha mesa (ralador, boleador, etc).

2. O que vocês percebem? Newton estava certo? A luz se propaga de forma retilínea?

2.4.3. Procedimentos metodológicos

O professor deve:

1. Inicialmente relembrar o que foi feito na última aula com relação às discussões e ao caráter corpuscular da luz e sua propagação retilínea;

2. Deve problematizar com os alunos sobre a propagação da luz, utilizando a observação por fendas pequenas presentes em objetos do cotidiano (ralador, etc.), onde o professor pede para que os alunos incidam a luz do laser sobre o menor orifício de um objeto, fazendo as perguntas, sendo possível relacionar com o experimento de Huygens;

Como sugestão de perguntas nesta atividade são: A luz se propaga de maneira retilínea? Observem a luz ao passar pela menor fenda que vocês encontrarem neste objetos, o que foi verificado? Façam a luz passar com e sem o objeto, vocês notam alguma diferença?



Figura 11: Utensílio doméstico: boleador. Fonte: próprio autor.

3. Realizar o experimento da difração da luz em um CD (Anexo B), sem realizar os cálculos;

Neste experimento os alunos vão perceber, que ao passar a luz do laser por um CD sem a superfície refletora, verão três ou mais pontos iluminados no anteparo, conforme a Figura a seguir



Figura 12: Difração da luz usando CD em uma turma de Ensino Médio. Fonte: próprio autor

4. Pedir para que os alunos respondam as questões do experimento:

- Ao passar a luz do laser sem o CD o que é verificado no anteparo?

- Represente com um desenho a passagem da luz pelo espaçamento constituído pelas trilhas do CD;

- O que é de se esperar se mudamos a cor luz do laser que incide sobre o CD? Justifique.

5. Pedir para que os alunos entreguem as atividades em grupos de até cinco componentes;

7. Recolher essa atividade de cada grupo; que pode ser a **3ª atividade de caráter somativo**;

2.4.4. Avaliação:

Será considerado satisfatório se os alunos percebam que a luz pode se comportar, também, como onda.

2.5. 4ª AULA

2.5.1 Objetivo:

- Efetuar cálculos em relação ao comportamento ondulatório da luz;

2.5.2. *Problematização inicial:*

1. Percebemos que a luz se comporta como onda ou partícula no experimento da aula anterior? Qual teoria descreve o que vimos na aula passada?

2.5.3. *Procedimentos metodológicos*

1. O professor deve inicialmente relembrar o que foi feito na última aula com relação às discussões e ao caráter ondulatório da luz;

2. Deve problematizar com os alunos o que foi observado usando as perguntas da problematização inicial, procurando com que os alunos expressem que a luz se comporta de maneira ondulatória;

3. Pedir para que tomem os resultados das medidas da última aula; que foram anotados na folha colocada como anteparo (ver anexo B)

4. Ensinar a realizar os cálculos do experimento com a equação;

$$d \cdot \sin\theta = m \cdot \lambda \text{ (Equação 2)}$$

Sendo:

$$m = \pm 1$$

d = distância entre o ponto central e o ponto do lado esquerdo (ou direito)

θ = ângulo de difração

λ = comprimento de onda da luz,

5. Pedir para que os alunos façam os cálculos em grupos;
6. Se necessário, o professor deve auxiliar os alunos nos cálculos;
6. Recolher essa atividade de cada grupo como a **4ª atividade de caráter somativo.**

2.5.4. Avaliação:

Será considerado consigam realizar os cálculos do experimento.

2.6. 5ª AULA

2.6.1. Objetivo:

- Confrontar a teoria corpuscular (Newton) e ondulatória da luz

2.6.2. Problematização inicial:

1. Percebemos que a luz se comporta como onda nas duas últimas aulas, porém nas primeiras percebemos que luz se comportava como partícula. Qual teoria está certa?

2.6.3. Procedimentos metodológicos

1. O professor deve inicialmente lembrar o que foi feito na última aula com relação às discussões e ao caráter ondulatório da luz e a realização do cálculo do experimento, estimulando a participação dos alunos;

2. Deve relembrar os conceitos da ótica ondulatória visto nas últimas aulas; e inclusive provado pelo experimento realizado com o CD;

3. Deve relembrar os conceitos da ótica corpuscular; que funcionavam em muitos aspectos, como o de reflexão da luz;

Ao final o professor deve estimular os alunos a fazer um novo experimento para comprovar a verificar que teoria é a mais correta;

4. Realizar o experimento do efeito fotoelétrico, incidindo luz de diferentes lasers sobre um *led* e verificando a voltagem em multímetro (Anexo C).

5. Pedir para que os alunos respondam, em grupo as respostas do roteiro desse experimento (Anexo C), que são:

- Com base nos valores indicados pelo multímetro, com qual dos lasers houve maior medida de voltagem?
- Justifique a questão 1, com base nos comprimentos de onda da luz característica a cada cor.

6. Recolher essa atividade de cada grupo que pode ser utilizada como a **5ª atividade de caráter somativo**;

2.6.4. Avaliação:

Será considerado satisfatório se os alunos percebam que a luz pode se comportar como onda, mas também pode se comportar como partícula;

2.7. 6ª AULA

2.7.1. Objetivo:

- Confrontar a teoria ondulatória da luz com a corpuscular e efeito fotoelétrico (Einstein)

- Compreender que a luz se comporta como onda e partícula ao mesmo tempo

2.7.2. Problematização inicial:

1. Percebemos que a luz se comporta como onda em algumas aulas, porém nas primeiras percebemos que luz se comportava como partícula. Qual teoria está certa? O que foi visto na aula passada pode contribuir como uma teoria ou outra?

2.7.3. Procedimentos metodológicos

O professor deve:

1. Inicialmente relembrar o que foi feito na 3ª e 4ª aula com relação às discussões e ao caráter ondulatório da luz, bem como a realização do cálculo do experimento;

2. Deve relembrar os conceitos da ótica corpuscular, como reflexão da luz, entre outros;

3. Deve apresentar o vídeo para os alunos do Dr. Quantun [Dr. Quantun, 2014]

Observação: Link direto:

<https://www.youtube.com/watch?v=ieZjg1eM9Ow>¹⁵

4. Deve explicar sobre o que na verdade é o efeito fotoelétrico usando imagens como a seguir;

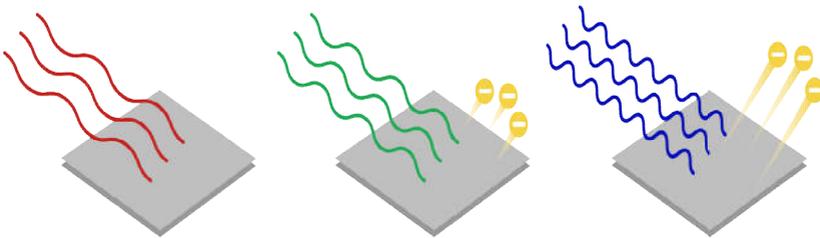


Figura 13. Efeito Fotoelétrico em um metal onde são incididos a luz vermelha (a esquerda), luz verde (centro) e luz violeta (a direita), mostrando que os elétrons são arrancados com maior velocidade (energia cinética) quando está sujeito a luz violeta [Khan Academy, 2018]¹⁶

¹⁵ [Dr. Quantun, 2014]. Dr. Quantun. Dualidade Onda-Partícula. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ieZjg1eM9Ow> Acesso em: 10 dez 2018

¹⁶ [Khan Academy, 2018]. Efeito Fotoelétrico (artigo). Disponível em <https://pt.khanacademy.org/science/physics/quantum-physics/photons/a/photoelectric-effect> Acesso em: 10 dez 2018

5. Para reforçar as explicações o professor apresentou o simulador do site *Phet Colorado* sobre Efeito Fotoelétrico [Phet, 2017], onde o efeito fotoelétrico pode ser observado ocorrendo para os menores comprimentos de onda como violeta e cessando para maiores como o vermelho.

Link direto para baixar o aplicativo em Java:

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric

Observação: conforme sugestão de roteiro de experimento virtual (Anexo D), há uma atividade opcional, usando o simulador Efeito Fotoelétrico [Phet, 2017] que poderá ser feita em sala de aula de forma demonstrativa, usando computador e projetor multimídia ou de forma de experimento virtual, usando o laboratório de informática para este fim. Se optar pela segunda forma deve-se reservar mais uma aula para este fim.

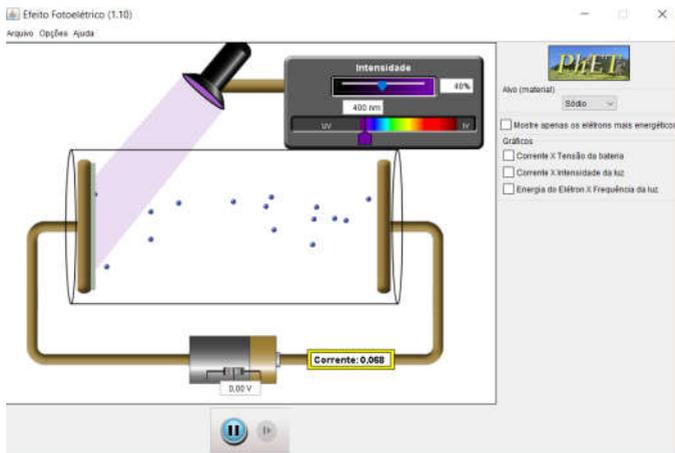


Figura 14: Simulador do Efeito Fotoelétrico Fonte: [PHET, 2017]

6. Concluir que a luz pode se comportar como onda e partícula ao mesmo tempo.

2.7.4. Avaliação:

Será considerado satisfatório se os alunos percebam que a luz pode se comportar também como onda e partícula ao mesmo o tempo.

2.8. 7ª AULA

2.8.1. Objetivo:

Verificar a aprendizagem dos alunos através da resolução de exercícios sobre a Natureza da Luz presentes no ENEM e vestibulares

2.8.2. Problematização inicial:

1. Percebemos que a luz se comporta como onda e partícula, agora vamos reforçar e aprimorar nossos conhecimentos com uma lista de exercícios.

2.8.3. Procedimentos metodológicos

1. O professor deve inicialmente relembrar o que foi feito na última aula com relação às discussões e ao caráter ondulatório e corpuscular da luz e da realização do cálculo do experimento;

2. Deve entregar uma lista de exercícios para cada aluno, que está no anexo E;

3. Após algum tempo deve-se fazer a correção dos exercícios com os alunos;

Observações: O professor poderá utilizar essas questões como base para elaboração de provas ou futuras listas de exercícios.

4. Concluir com um momento de avaliação da sequência didática com perguntas como:

- O que vocês aprenderam no decorrer dessas aulas?

- O conhecimento científico é absoluto? Houve variações no conceito de luz no decorrer da História? Quais foram as principais?

- O que vocês mais gostaram de fazer a realização desta sequência didática?

- Qual teoria que é aceita: a corpuscular ou a ondulatória?

- Além da natureza da luz, o que mais vocês aprenderam?

2.8.4. Avaliação:

Será considerado satisfatório se os alunos demonstrem que aprenderam nas últimas aulas sobre o comportamento da luz como onda e partícula ao mesmo o tempo.

2.9. Avaliação da sequência didática

1. Durante a realização da sequência didática, os alunos entregaram 5 atividades que podem ser avaliadas como uma nota de avaliação contínua ou de trabalho.

2. As questões da lista de exercícios podem serem usadas como base para elaboração de provas ou futuras listas de exercícios.

3. O professor, dentro do possível, pode pontuar a participação como nota extra, valorizando esse aspecto importante na realização da sequência didática.

3. REFERÊNCIAS:

[BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS, 2009] BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS, R & PORTER-DAVIS, k. NNIN Document: USING CDs AND DVDs AS DIFFRACTION GRATINGS. Georgia Institute of Technology. 2009

[Bellucco e Carvalho, 2014], Bellucco, A. e de Carvalho, A. M. P. Uma proposta de sequência de ensino investigativa sobre quantidade de movimento, sua conservação e as leis de Newton. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 31, n. 1, p. 30-59, abr. 2014

[BRASIL, 2000] BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza (Ensino Médio). Brasília: MEC, 2000.

[BRASIL, 2002] BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais + (PCN+) - Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2002.

[BRASIL, 2016] BRASIL, Base Nacional Curricular Comum, 2ª Versão, Ciências da Natureza, p. 136-152. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/documentos/bncc-2versao.revista.pdf>. Acesso em 08 nov. 2016

[DARRIGOL, 2012] DARRIGOL, O. A History of Optics from Greek Antiquity to the Nineteenth Century. Oxford: Oxford University Press, 2012. 327 p. ISBN-13: 978-0-19-964437-7.

[Dr. Quantun, 2014]. DR. Quantun. Dualidade Onda-Partícula. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ieZig1eM9Ow>
Acesso em: 08 ago 2017

[Eisberg, 2010] EISBERG, R. M., RESNICK, R., **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos e Partículas**, Editora Campus, 2010.

[Feynman, 2008] RICHARD P. FEYNMAN Lições de Física de Feynman – A Edição Definitiva – 4 Volumes 1ª Ed. 2008 Ed. Bookman ISBN 9788577802593;

[Halliday, 2012] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. E WALKER. J. Fundamentos de Física Vol. 4 – Ótica e Física Moderna– 9ªedição 2012 Ed. LTC. ISBN 9788521619062;

[Marques & Ueta, 2007] MARQUES, G C & UETA, N. **Ótica (Básico)**. E-Livros. Disponível em <http://efisica.if.usp.br/optica/basico/refracao/snell/> Acesso em 08 dez. 2018

[Méheut e Psillos, 2004] Méheut, Martine and Psillos, Dimitris Teaching-learning sequences: aim sand tools for science education research', International Journal of Science Education, 26:5,515 — 535, 2004

[Nussenzveig, 2014] NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica Vol. 4 – Ótica Ótica Relatividade e Física quântica – 2ª Ed. 2014.

[Phet, 2017] Efeito Fotoelétrico. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric. Acesso em 12 ago 2017 e 10 dez 2018

[Pires, 2011] PIRES, A. S. T. **Evolução das Idéias da Física**. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011.

[Santa Catarina, 2014], SANTA CATARINA, 2014, PROPOSTA CURRICULAR DE SANTA CATARINA, Secretaria de Estado da Educação, [S.N.], 192 p.

[Sears, 2009] YOUNG, HUGH D., FREEDMAN, ROGER A., SEARS Física 4, Ótica e Física Moderna, 12ª Ed. 2009, , Editora Addison Wesley, ISBN 9788588639355.

[Silva, 2003] Silva, C. C. & Martins, R. A. A Teoria Das Cores De Newton: Um Exemplo Do Uso Da História Da Ciência Em Sala De Aula *Ciência & Educação*, v. 9, n. 1, p. 53-65, 2003

[Tossato, 2005] TOSSATO, C. R. A função do olho humano na óptica do final do século XVI *Revista ScientiæSudia*, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 415-41, 200. Disponível em <http://www.revistas.usp.br/ss/article/view/11044/12812> Acesso 10 dez 2018

[TVO, 1984] **DUALIDADE ONDA-PARTICULA. Produzido por** TV Educativa Pública da província de Ontário, Canadá. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2NuLa29WKnI> Acesso em: 07 ago 2017

[VAUGHAN, 2014] VAUGHAN, M. P. **Optics** UniversityCollege Cork. Disponível em: <http://www.physics.ucc.ie/mVAUGHAN/lecturing/PY3101/Optics.pdf> Acesso em 10 out 2018

[Vigotsky, 2001] VYGOTSKY, L. S. A construção do pensamento e da linguagem. Tradução Paulo Bezerra. São Paulo: Martins Fontes, 2001. 496 p.

[Vygotksy, 1991] VYGOTSKY, L. S. A Formação Social da Mente, Lev S. Vygotksy, 90 págs., Ed. Martins Fontes, versão digital.

ANEXO A – Texto: Newton e as Cores

Texto integral publicado por: Marco Aurélio da Silva Santos

Disponível

em:

<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/newton-as-cores.htm>

Acesso em 12 out 2017



Newton e a experiência da dispersão da luz.

Newton foi cientista, físico e matemático inglês muito reconhecido pelos seus inúmeros trabalhos no campo da mecânica. Contudo, não se ateve somente a esse ramo da física. No ano de 1672, ele publicou um trabalho onde apresentava idéias sobre as cores dos corpos. Passados aproximadamente três séculos e meio, ainda hoje as idéias propostas por este cientista são aceitas.

Por meio de um simples experimento Isaac Newton percebeu a dispersão da luz branca, ou seja, conseguiu visualizar que se a mesma incidisse sobre um prisma de vidro,

totalmente polido, dava origem a inúmeras outras cores. Foi a partir daí que esse cientista começou seus estudos sobre as cores dos corpos. Muitos anos antes de Newton, já se tinha a ideia de que a luz branca dava origem a um feixe colorido quando atravessava um prisma de vidro. No entanto, nessa época tinha-se a ideia de que o aparecimento das cores a partir da luz branca acontecia em razão das impurezas que a mesma recebia quando incidia sobre o prisma de vidro.

Isaac Newton curioso em descobrir por que tal acontecimento ocorria, pegou um prisma totalmente polido e o colocou frente a um orifício que ele mesmo fizera na janela do seu quarto. Com esse feito, ele percebeu que a luz branca, proveniente do Sol, se dispersava em feixes coloridos e a esse conjunto de cores chamou **spectrum**. Newton não era a favor da ideia de que esse colorido surgia devido a impurezas existentes no prisma. Assim sendo, realizou novo experimento onde deixava apenas uma cor passar através de um segundo prisma. Com isso, verificou que o mesmo não adicionava nada ao feixe de luz que incidia sobre ele. Dessa forma, o físico lançou a hipótese de que a luz não era pura, mas sim formada pela mistura ou superposição de todas as cores do espectro, e concluiu ainda que a luz se decompõe por causa da refração que sofre ao passar de um meio para outro com índices de refração diferentes.

Além de fazer o estudo sobre a dispersão da luz, Newton teorizou sobre as cores dos corpos. Segundo ele **“as cores de todos os corpos são devidas simplesmente ao fato de que**

eles refletem a luz de uma certa cor em maior quantidade do que as outras". Essa teoria teve grande oposição no meio científico, fato esse que levou Isaac Newton a publicar seus trabalhos sobre a óptica somente muitos anos mais tarde.

**ANEXO B – Sugestão de Roteiro de atividade experimental:
Difração da Luz utilizando Cd's**

Por: Enio dos Anjos baseado BALACHANDRAN; K. PORTER-DAVIS, R. USING CDS AND DVDS AS DIFFRACTION GRATINGS. Georgia Institute of Technology. 2009

Este experimento é direcionado a estudantes do 2º ano do Ensino Médio.

Objetivo:

- Medir o espaçamento entre as grades de difração de um CD através da difração da luz

Materiais:

Quantidade	Descrição	Imagem	Onde encontrar
1	Cd antigo		Lojas de materiais de informática
1	Laser		Lojas de 1,99, Lojas de Armarinhos, Hipermercados. Observação:
1	Grampo de roupa		Lojas de 1,99, Lojas de Armarinhos, Super ou Hipermercados.

1	Folha A4		Papelaria, Super e Hipermercados
1	Fita Crepe		Papelaria, Materiais de Construção ou de Tintas
1	Régua		Lojas de 1,99, Lojas de Armarinhos, Super ou Hipermercados.

Material opcional:

Quantidade	Descrição	Imagem	Onde encontrar
3	Lasers de cores diferentes (azul ou violeta, verde e vermelho)		Lojas de 1,99, Lojas de Armarinhos, Observação: geralmente é possível encontrar somente os lasers vermelho e verde) Para laser violeta ou azul: Mercado livre http://www.mercadolivre.com.br/

Como se faz:

1. Com um CD antigo em mãos, retire toda a parte espelhada, colando a fita crepe sobre essa parte e puxando em seguida conforme a Figura 1. É necessário repetir o procedimento várias vezes.



Figura 1. Removendo a parte espelhada do CD. Fonte [BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS ,2009]

2. Após o procedimento de retirar a parte espelhada, coloque-o preso em prendedores de roupas, com o objetivo de dar suporte para o mesmo ficar parado em cima de uma mesa, como mostrado na Figura 2.



Figura 2. Colocando prendedores para dar suporte ao CD.

Fonte: próprio autor

Isso também pode ser feito com o laser, de modo a ficar mais fixo como na Figura 3.



Figura 3. Colocando grampos para suporte no laser. Fonte: próprio autor

3. Coloque uma folha de papel A4 colando no verso da mesma com fita crepe, para fixá-la na parede sala, como mostra a Figura 4;



Figura 4. Fixando a folha A4 na parede. Fonte: próprio autor

4. Meça 10 cm entre o CD e essa folha, a folha servirá de anteparo, como mostra a Figura 5.



Figura 5. Medindo a distância entre o CD e a parede. Fonte: próprio autor

5. Ligue o laser e aponte sobre o CD como mostra a Figura abaixo



Figura 6. Apontando o laser contra o CD. Fonte: próprio autor

6. Marque com uma caneta a posição dos pontos que aparecem (devem aparecer três pontos, um no centro, e outros dois sendo um em cada lado), como mostra a Figura 7.



Figura 7. Marcando os pontos. Fonte: próprio autor

7. Faça o cálculo usando as Equações para determinar d como sendo o espaçamento entre as trilhas do CD. Para isto, utilize a seguinte relação:

$$d \sin \theta = m \lambda \text{ (Equação 1)}$$

Sendo:

$$m = \pm 1$$

d = distância entre o ponto central e o ponto do lado esquerdo (ou direito)

θ = ângulo de difração

λ = comprimento de onda da luz,

O comprimento de onda do laser normalmente vem indicado no mesmo. Caso não haja esta indicação, poderá ser estimado através da Figura 8.

Cor	Comprimento de onda
vermelho	~ 625-740 nm
laranja	~ 590-625 nm
amarelo	~ 565-590 nm
verde	~ 500-565 nm
ciano	~ 485-500 nm
azul	~ 440-485 nm
violeta	~ 380-440 nm

Figura 8. Comprimento de Onda. Fonte:[Wikipedia, 2018.
https://pt.wikipedia.org/wiki/Comprimento_de_onda].

Para encontrar o ângulo θ , meça a distância entre o CD e a folha A4 e a distância até o ponto da direita ou esquerda (x) e com base na Figura e equação abaixo podemos determinar o ângulo, conforme a Figura 9.

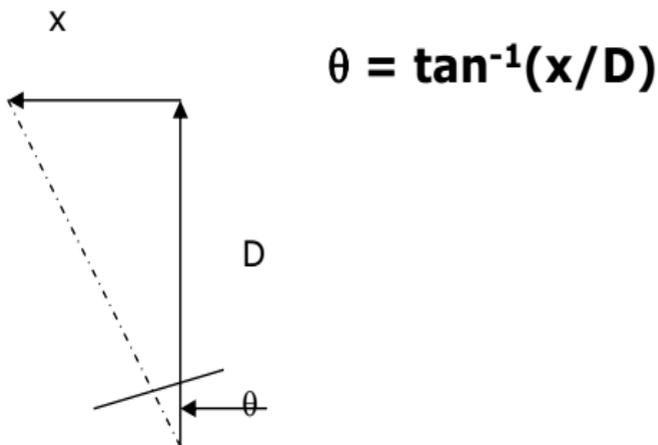


Figura 9. Encontrando o ângulo θ . Fonte: [BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS, 2009]

Optional: Utilizando os lasers de cor diferente do primeiro utilizado repetir todo o procedimento experimental a partir do item 3.

O que observar:

- Nesse experimento verificamos que a luz ao passar pelas linhas de gravação do CD, é difratada, ou seja, sua trajetória muda, criando padrões de interferência.

- Conhecendo ângulo de refração, distância entre os pontos e distância do CD ao anteparo, podemos determinar a largura média das linhas.

Questões:

- Ao passar a luz do laser sem o CD o que é verificado no anteparo?
- Represente com um desenho a passagem da luz pelo espaçamento constituído pelas trilhas do CD;
- O que é de se esperar se mudamos a cor luz do laser que incide sobre o CD? Justifique.

REFERÊNCIAS:

[BALACHANDRAN; PORTER-DAVIS,2009] BALACHANDRAN; K; PORTER-DAVIS, R NNIN Document: NNIN 1 USING CDs AND DVDs AS DIFFRACTION GRATINGS.Georgia Institute of Technology. 2009

CUTNELL, J D.; JOHNSON, K. W. **Física**.Vol. 2. 1ª.ed. LCT, 2006.

ANEXO C – Sugestão de Roteiro de experimento: Efeito Fotoelétrico em um LED

Por: Enio dos Anjos

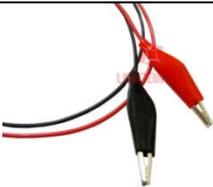
Este experimento é direcionado a estudantes do 2º ano do Ensino Médio.

Objetivo:

- Comprovar o efeito fotoelétrico utilizando um LED

Materiais:

Quantidade	Descrição	Imagem	Onde encontrar
3	Lasers de cores diferentes (azul ou violeta, verde e vermelho)		Lojas de 1,99, Lojas de Armarinhos, Observação: geralmente é possível encontrar somente os lasers vermelho e verde) Para laser violeta ou azul: Mercado livre http://www.mercadolivre.com.br/
1	LED de auto-brilho		Mercado livre http://www.mercadolivre.com.br/ . Lojas de materiais eletrônicos. Na região de Blumenau, lojas Proesi: http://proesi.com.br/ e Blupel: http://proesi.com.br/

1	Multímetro		<p>Mercado livre http://www.mercadolivre.com.br/ . Lojas de materiais eletrônicos. Na região de Blumenau, lojas Proesi: http://proesi.com.br/ e Blupel: http://proesi.com.br/</p>
2	Fios com garra jacaré		<p>Mercado livre http://www.mercadolivre.com.br/ . Lojas de materiais eletrônicos. Na região de Blumenau, lojas Proesi http://proesi.com.br/ e Blupel http://proesi.com.br/</p>
1	Lanterna ou lanterna de celular		<p>Lojas de 1,99, Lojas de Armarinhos, Observação: quanto a lanterna de celular, muitos alunos no Ensino Médio portam o aparelho, facilitando esse uso para fim pedagógico</p>

Como se faz:

Ligue o multímetro e deixe na posição para medir voltagem, como mostrado na Figura abaixo, em 20 V



Figura 1. Em corrente contínua, deixe o multímetro em 20 V.

Fonte: próprio autor

6. Conecte a garra jacaré preta no multímetro em COM (Comum) e com o terminal VmA que está em cima do comum, conforme Figura 2.

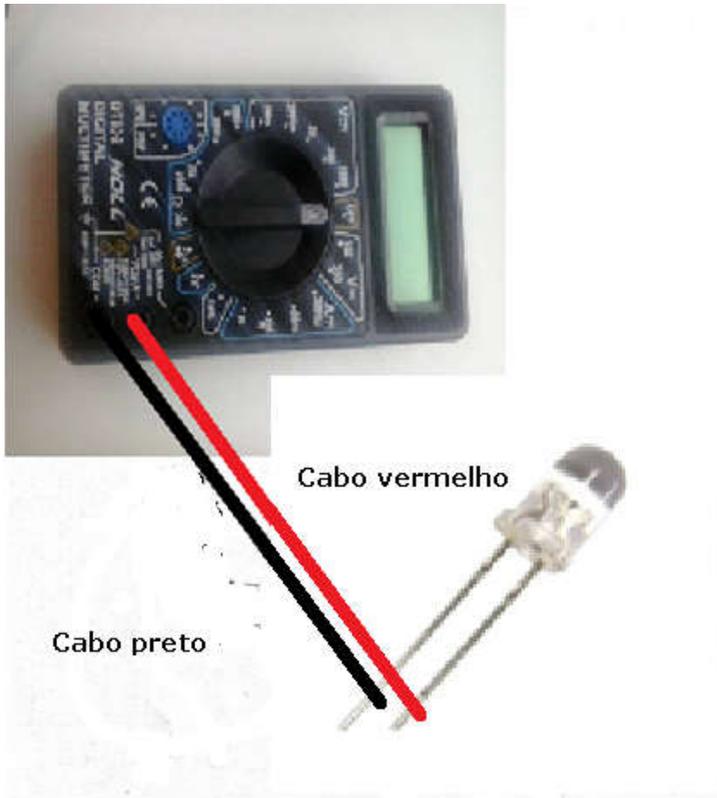


Figura 2. Conectando o multímetro com o led alto-brilho . Fonte: próprio autor

7. Incida luz do laser sobre o LED e verifique se existe alguma medida de voltagem;

8. Se não houver medida, gire o botão do multímetro para uma voltagem menor até encontrar alguma medida de voltagem

9. Anote os valores na tabela a seguir, fazendo o mesmo procedimento com cada laser diferente e ao final com a luz branca de uma lanterna

	Valor	Escala
Laser vermelho		
Laser verde		
Laser violeta		
Luz branca (lanterna)		

Tabela 1. Medida de voltagem e respectiva escala usando diferentes lasers e luz branca (lanterna)

Com relação a escala anotar se o multímetro está na escala de 1000 V, 200 V, 20 V, 2000 mV ou 200 mV, procurando fazer todas as medidas com a mesma escala, se possível;

O que observar:

- Quando há a incidência de luz sobre um metal, percebe-se o efeito fotoelétrico que na verdade é a emissão de elétrons a superfície do material na presença de luz.

- O efeito fotoelétrico é percebido em certos comprimentos de onda próximos ao violeta e não existe próximo ao vermelho.

Questões

- Com base nos valores indicados pelo multímetro, com qual dos lasers houve maior medida de voltagem?

- Justifique a questão 1, com base nos comprimentos de onda da luz característica a cada cor.

Referências:

EISBERG, R. M., RESNICK, R., Física Quântica: Átomos,
Moléculas, Sólidos e Partículas, Editora Campus, 2010

ANEXO D – Sugestão de Roteiro de experimento virtual: Efeito Fotoelétrico

Por: Enio dos Anjos

Este experimento é direcionado a estudantes do 2º ano do Ensino Médio.

Objetivo:

- Mostrar o efeito utilizando diferentes materiais em um simulador virtual

Materiais a serem utilizados

Computador com Windows ou Linux instalado;

Java instalado (pode ser a ultima versão)

Preparação do computador para a atividade:

1. Utilizando um navegador de internet, abra o site do PHET: https://phet.colorado.edu/pt_BR/, como mostra a Figura 1:



Figura 1. Tela do Website do PHET COLORADO (em dezembro de 2018)

2. Na tela do site, clique em Entre E Simule, ou seja, onde a seta branca indica (Figura 2).



FIGURA 2. Tela do Website do PHET COLORADO

3. Ao abrir à nova pagina clique em Física como indicado pela seta Figura 3.



Figura 3. Tela da página com opções de simulação em Física.

4. Abrindo os itens abaixo da página Física, clique em Luz e Radiação como mostra a Figura 4 onde está indicado pela seta.

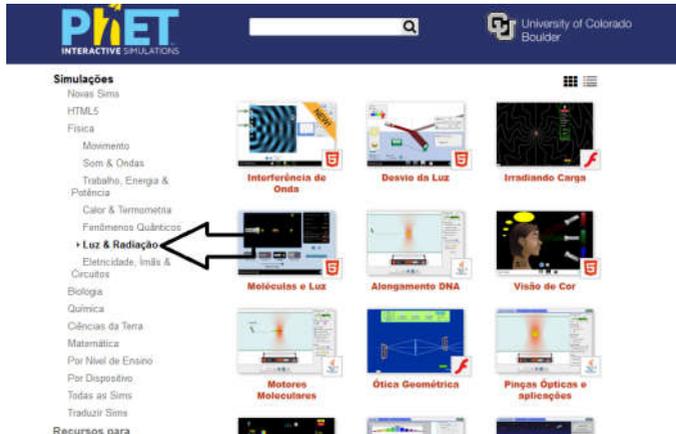


Figura 4. Tela da página com opções de simulação em Física.

5. Procure e clique em **Efeito Fotoelétrico**, como indicado na Figura 5 pela seta branca.



Figura 5. Tela da página para acessar o experimento de pêndulos (Laboratório de Pêndulos)

Observação 1: O link direto do simulador Efeito Fotoelétrico é

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric
que foi verificado em 10 de dezembro de 2018 pelo autor desse roteiro.

6, Deve-se clicar no símbolo de PLAY, como indica a seta 1 da Figura a seguir (Figura 6), e logo em seguida baixar o arquivo, clicando em SALVAR O ARQUIVO conforme a seta 2 da Figura 6.

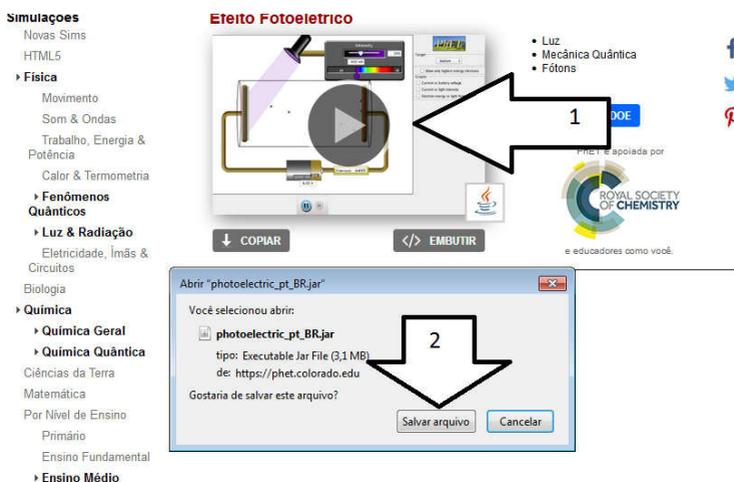


Figura 6. Tela da página para execução do Efeito Fotoelétrico, com os procedimentos 1 e 2, respectivamente para baixar o arquivo.

7. Deixe-o completar o download em seu computador, e depois localize e o execute.

Observação: Ao executar esse arquivo, não há necessidade de internet (off-line),

Como se faz:

1. Com o simulador aberto, verifique e os botões dos parâmetros de intensidade (luminosa) (seta 1), voltagem (seta 2) e corrente elétrica (seta 3) estão em zero e de comprimento de onda está em 400 nm (seta 4), e o material é o sódio (seta 5), conforme a Figura 7

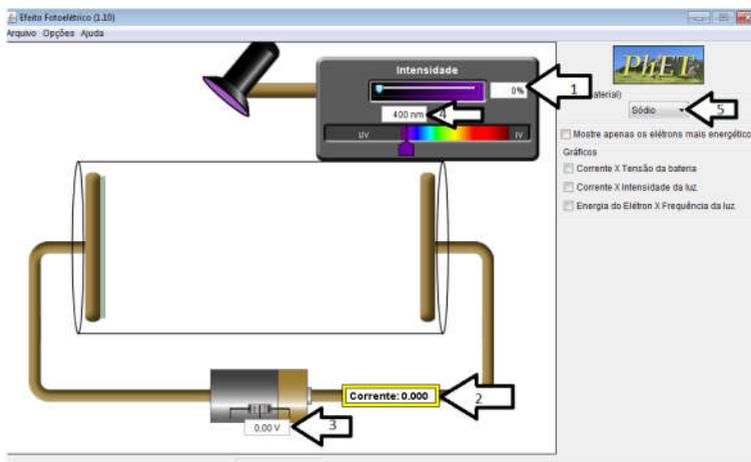


Figura 7. Setas indicando os botões dos parâmetros de intensidade (luminosa) (seta 1), voltagem (seta 2) e corrente elétrica (seta 3) estão em zero e de comprimento de onda está em 400 nm (seta 4), e o material é o sódio (seta 5), que devem ser verificados

2. Aumente a intensidade da luz, digitando 50 % indicada pela seta 1 e observe o que ocorre. Mantenha o botão da seta 2 na mesma posição inicial, e observe o valor de corrente elétrica, indicado pela seta 3, conforme a Figura 8;

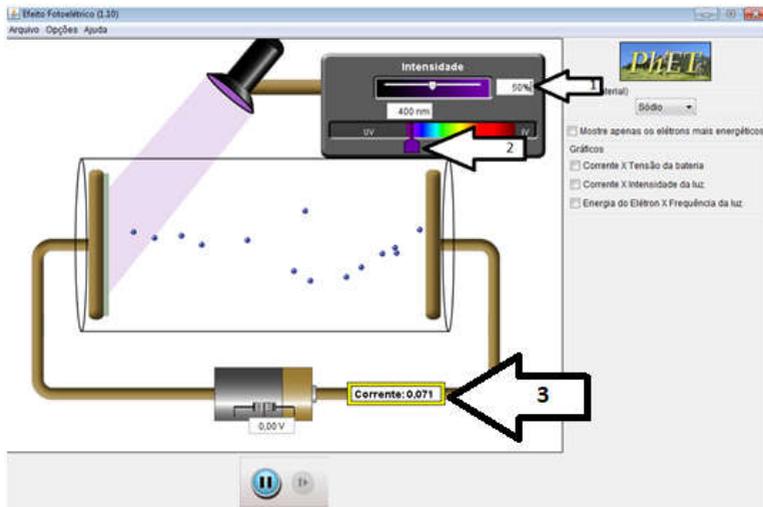


Figura 8. Aumentando a intensidade da luz digitando 50%, onde é indicado pela seta 1 e mantendo o botão 2 na mesma posição e verificando o valor de corrente elétrica indicado pela seta 3.

3. Anote o valor na tabela 1 de corrente elétrica encontrado de corrente elétrica

4. Aumente a intensidade até, digitando 100 % indicada pela seta 1, conforme Figura 8, e observe o que ocorre com a corrente elétrica.

5. Anote o valor encontrado de corrente elétrica na tabela 1.

6. Varie o comprimento de onda, conforme indicado pela seta branca da Figura 9 e verifique o que ocorre com a corrente elétrica, movendo para o botão indicando para direita para aumentar o comprimento de onda e para a esquerda para diminuir o comprimento de onda.

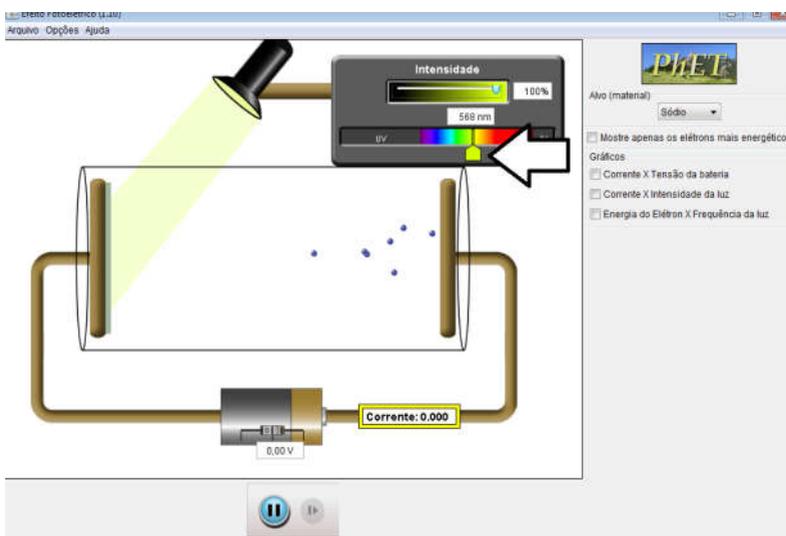


Figura 9. Movendo o botão do comprimento de onda indicado pela seta branca

11. Anote o valor em cada situação até completar a tabela 1 a seguir

Material: Sódio			
Medida	Intensidade de luz	Comprimento de onda	Valor de corrente elétrica
1	50%	400 nm	
2	100 %		
3	50%		
4	100 %		
5	50%		
6	100 %		

7	50%		
8	100 %		
9	50%		
10	100 %		

Tabela 1. Dados do material sódio

10. Troque o material, selecionando o botão indicado pela seta branca da Figura 10 e faça os procedimentos a partir do item 1 desta seção Como se faz.

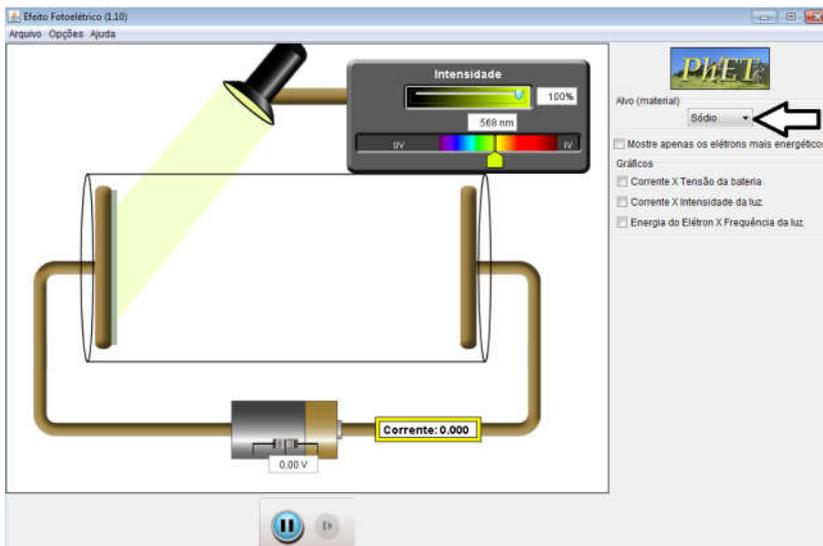


Figura 10. Selecionando o botão de trocar o material, indicado pela seta branca

11. Preencha a tabela 2 com os dados do novo material

Material:			
Medida	Intensidade de luz	Comprimento de onda	Valor de corrente elétrica

1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
9			
10			

Tabela 1. Dados do outro material escolhido

O que observar:

Ao incidir luz no eletrodo esquerdo elétrons são ejetados e podiam ser detectados ao atingir o eletrodo direito através de uma pequena corrente elétrica ou uma pequena voltagem. Esses elétrons, chamados de fotoelétrons são emitidos com alguma energia cinética.

Einstein mostrou que os fótons emitidos por uma fonte não percorrem sua trajetória como simples partículas clássicas, mas sim como ondas. Porém, sua teoria não descrevia a propagação da luz como apenas “ondas clássicas”, mas como pacotes de energia (E) discretos em que a energia desses pacotes era proporcional à frequência (ν), ou seja, proporcional a “cor” da luz incidida sobre o eletrodo, através da seguinte equação [Eisberg, 2010]:

$$E = h\nu \text{ (Equação 1)}$$

Nesta relação, h é a constante de Planck. Einstein considerou ainda que, quando um elétron é emitido por um metal, sua energia cinética (K) deve ser:

$$K = h\nu - w \text{ (Equação 2)}$$

Sendo w a função trabalho, que é a energia necessária para retirar o elétron desse metal. Dessa forma, Einstein descreveu a luz como sendo um pacote de fótons que pode interagir com a matéria de forma corpuscular, mesmo propagando-se como onda, sendo esta a base da teoria da dualidade onda-partícula da luz.

Referencias:

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. – “Fundamentos de Física 4” – São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora, 6ª edição.

[Eisberg, 2010] EISBERG, R. M., RESNICK, R., **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos e Partículas**, Editora Campus, 2010.

[Phet, 2017] Efeito Fotoelétrico. Disponível em:

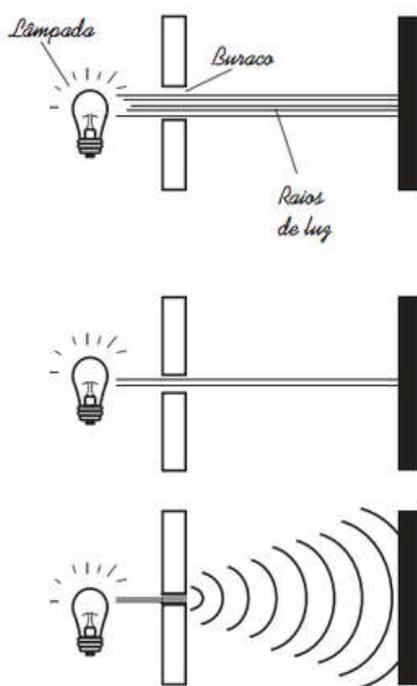
https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric.

Acesso em 12 ago 2017 e 10 dez 2018

ANEXO E – Questões (Lista de exercícios)

1. (ENEM – MEC)

Ao diminuir o tamanho de um orifício atravessado por um feixe de luz, passa menos luz por intervalo de tempo, e próximo da situação de completo fechamento do orifício, verifica-se que a luz apresenta um comportamento como o ilustrado nas Figuras. Sabe-se que o som, dentro de suas particularidades, também pode se comportar dessa forma.



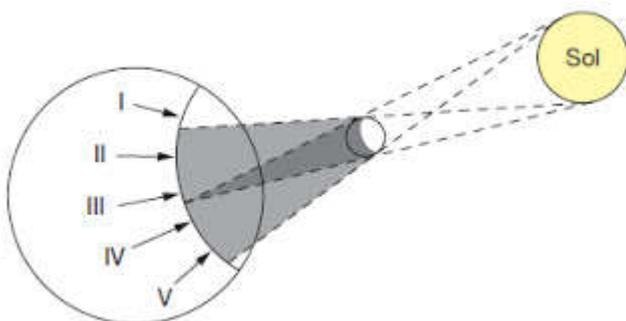
FIOLHAIS, C. Física divertida. Brasília: UnB, 2000 (adaptado)
(Foto: Reprodução/Enem)

Em qual das situações a seguir está representado o fenômeno descrito no texto?

- A. Ao se esconder atrás de um muro, um menino ouve a conversa de seus colegas.
- B. Ao gritar diante de um desfiladeiro, uma pessoa ouve a repetição do seu próprio grito.
- C. Ao encostar o ouvido no chão, um homem percebe o som de uma locomotiva antes de ouvi-lo pelo ar.
- D. Ao ouvir uma ambulância se aproximando, uma pessoa percebe o som mais agudo do que quando aquela se afasta.
- E. Ao emitir uma nota musical muito aguda, uma cantora de ópera faz com que uma taça de cristal se despedace.

2. (ENEM – MEC)

A Figura abaixo mostra um eclipse solar no instante em que é fotografado em cinco diferentes pontos do planeta.



Três dessas fotografias estão reproduzidas abaixo.



As fotos poderiam corresponder, respectivamente, aos pontos:

A) III, V e II.

B) II, III e V.

C) II, IV e III.

D) I, II e III.

E) I, II e V.

3. (ENEM – MEC)

Alguns povos indígenas ainda preservam suas tradições realizando a pesca com lanças, demonstrando uma notável habilidade. Para fisgar um peixe em um lago com águas tranquilas o índio deve mirar abaixo da posição em que enxerga o peixe.

Ele deve proceder dessa forma porque os raios de luz

A. refletidos pelo peixe não descrevem uma trajetória retilínea no interior da água.

B. emitidos pelos olhos do índio desviam sua trajetória quando passam do ar para a água.

C. espalhados pelo peixe são refletidos pela superfície da água.

D. emitidos pelos olhos do índio são espalhados pela superfície da água.

E. refletidos pelo peixe desviam sua trajetória quando passam da água para o ar.

4. (UFSC-SC 2014 - adaptada)

As ondas eletromagnéticas, como a luz e as ondas de rádio, têm um “sério problema de identidade”. Em algumas situações apresentam-se como onda, em outras, apresentam-se como partícula, como no efeito fotoelétrico, em que são chamadas de fótons. Isto é o que chamamos de dualidade onda-partícula, uma das peculiaridades que encontramos no universo da Física e que nos leva à seguinte pergunta: “Afinal, a luz é onda ou partícula?”. O mesmo acontece com um feixe de elétrons, que pode se comportar ora como onda, ora como partícula.



Com base no que foi exposto, assinale com X a(s) proposição(ões) CORRETA(S).

(). Um feixe de elétrons incide sobre um obstáculo que possui duas fendas, atingindo um anteparo e formando a imagem apresentada na Figura acima. A imagem indica que um feixe de elétrons possui um comportamento ondulatório, o que leva a concluir que a matéria também possui um caráter dualístico.

(). O fenômeno da difração só fica evidente quando o comprimento de onda é da ordem de grandeza da abertura da fenda.

(). Após a onda passar pela fenda dupla, as frentes de ondas geradas em cada fenda sofrem o fenômeno de interferência, que pode ser construtiva ou destrutiva. Desta forma, fica evidente o princípio de dependência de propagação de uma onda.

(). Christian Huygens, físico holandês, foi o primeiro a discutir o caráter dualístico da luz e, para tanto, propôs o experimento de fenda dupla