



SEQUÊNCIA DIDÁTICA

PARA O ENSINO DA ÓPTICA

Professora: Nayana Souza

APRESENTAÇÃO

Caro professor(a) esse material é um produto do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) e tem o objetivo de oferecer uma Sequência de Ensino Investigativa (SEI) para o estudo da óptica, que pode ser aplicada em uma disciplina de física na Formação Geral Básica (FGB) ou nos Itinerários Formativos (IFs). A partir dessa sequência, o discente estudará desde a teoria corpuscular da luz proposta por Newton até o efeito fotoelétrico de Einstein. Como a SEI foi desenvolvida para as trilhas de aprofundamento, ela foi construída a partir dos eixos estruturantes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) que são: *Investigação Científica; Processos Criativos; Mediação e Intervenção Sociocultural e; Empreendedorismo* (BRASIL, 2018).

Para a SEI foram adotados o ensino por investigação de Carvalho (2020), que explica as interações dos professores e alunos em etapas, fundamentado pela teoria de instrução do Bruner (2006), que enuncia os modos de representação vividos pelos aprendizes (BRUNER, 2006; MOREIRA, 2019) e apresenta o currículo em espiral e a aprendizagem por descoberta. Esses dois referenciais propiciam uma sequência de atividades que sejam desafiadoras e estimulem o desenvolvimento de habilidades críticas e reflexivas almejando a *alfabetização científica* (SASSERON, 2018).

OBJETIVO

Oportunizar o estudo da óptica e a alfabetização científica através de uma Sequência de Ensino Investigativa (SEI), utilizando os pressupostos da Teoria de Instrução de Bruner.

DESCRIÇÃO DA SEQUÊNCIA

Formato: Presencial

Público-alvo: alunos da 2ª série

Disciplina: Trilhas de aprofundamento de Física

Formas de Avaliação: diário de bordo, participação e realização dos experimentos nas aulas e as apresentações na mostra científica e cultural.

Autora: Nayana Helena Negrão de Souza

Orientadora: Professora Dra. Vanessa Carvalho de Andrade

REFERENCIAL TEÓRICO

A Sequência de Ensino Investigativa (SEI) articula as teorias sociointeracionista e construtivista, usualmente as de Vygotsky e Piaget. Entretanto, para este trabalho será utilizada a teoria construtivista de Jerome Bruner, que afirma que o ensino deve ser identificado pelo estudante em termos de problemas para que haja uma aprendizagem efetiva. Esse destaque na teoria de Bruner, a aprendizagem por descoberta, direciona o aluno a desenvolver a sua capacidade de solucionar problemas, o autor retrata que a criança realiza um processo similar ao que o cientista faz em seus laboratórios (BRUNER, 2006; MOREIRA, 2019). Além desse fator, o que favoreceu a escolha desse referencial é a teoria de instrução (aprendizagem) de Bruner ser prescritiva e descritiva, ou seja, apresenta como o indivíduo aprende e estabelece normas e condições para que isso aconteça (MOREIRA, 2019). Bruner (1976) também retrata a importância da linguagem para a organização do pensamento, em um trecho diz “Penso frequentemente que faria mais pelos meus alunos ensinando-lhes a ler e a pensar do que dando minha matéria” (BRUNER, 1976, p. 103) e em outro trecho “se não há uma preocupação desenvolvida das diferentes funções a que a linguagem serve, a aflição resultante não será apenas de um falar e escrever falho, mas de uma mente inepta” (BRUNER, 2006, p. 116). Além da teoria de instrução ser cognitivista, também apresenta elementos sociointeracionistas que auxiliam a SEI.

A SEI está estruturada na aprendizagem por descoberta através dos estágios de desenvolvimento intelectual (*Representação ativa, icônica e simbólica*) descritos por Bruner, e na linguagem como instrumento de estruturação do pensamento. Aliada a essa teoria de ensino construtivista, será apresentado durante a SEI ambientes de interação entre os estudantes com os seus pares e com o professor através de instrumentos e signos (VYGOTSKY, 1991) descritos no ensino por investigação de Carvalho (2020). Durante as aulas são seguidas as quatro etapas de planejamento, elaboração e gerenciamento em sala (CARVALHO, 2020), que são: *Etapa da distribuição do material experimental e proposição do problema pelo professor; Etapa da resolução do problema pelos alunos; Etapa da sistematização dos conhecimentos elaborados nos grupos e; Etapa do escrever e desenhar*. Para o início da sequência investigativa é proposta uma questão-problema geral que é “Como podemos definir a natureza da luz?”. A fim de solucionar essa questão-problema ao final da SEI, em todas as Atividades Investigativas (AIs) serão propostas as questões-problema específicas.

Frequentemente, o estudo sobre a luz é compreendido no capítulo de óptica nos livros da 2ª série, em que alguns conceitos são trabalhados no capítulo de ondulatória na própria 2ª

série e outros na introdução à física moderna, logo após o conteúdo de eletromagnetismo na 3ª série (GAMA, 2016). Dentro desse contexto, normalmente a óptica tem uma abordagem com enfoque na geometria, não sendo discutida a natureza da luz, e, quando acontece isso, ocorre de forma superficial com a disputa entre Newton e Huygens (ORTEGA; MOURA, 2019). A história da ciência não costuma ser apresentada nos livros didáticos com o desenvolvimento das teorias, abordando como uma teoria prevaleceu em detrimento de outra e qual a relação entre os acontecimentos históricos e a ciência (MARTINS, 2006). Com base na importância do estudo da física moderna e da natureza da luz, esta sequência irá trabalhar com a óptica desde as teorias do século XVII até início do século XX. Martins (2006) afirma que não é possível substituir o conteúdo de física pela história da ciência, mas esta é importante para que os alunos compreendam que não existem “grandes gênios” que criam teorias de repente e do nada, pois muitas vezes as suas teorias surgiram com grandes falhas, sem comprovações experimentais e observacionais, com explicações incompletas que necessitaram de aperfeiçoamento e até mesmo de reformulações. A ciência está inserida num contexto social e cultural, de tradições que influenciam diretamente a sociedade e vice-versa (MARTINS, 2006).

Dentro do ensino de Física é importante que o aluno saiba que o processo científico não é simples e direto, e que não existe uma equação infalível. Há uma arte da pesquisa, que pode ser aprendida, mas esta não é uma sequência de etapas que deve ser seguida sempre, como uma receita de bolo (MARTINS, 2006). A história da ciência propicia uma compreensão melhor sobre a natureza da ciência e auxilia na aprendizagem dos conteúdos, tendo em vista que os alunos são seres inseridos num contexto social, e, como citado na LDB, a formação se dá também no desenvolvimento para o pleno exercício da cidadania. Durante as aulas é importante a construção de uma cultura científica efetiva e a abordagem histórica é fundamental para evitar concepções equivocadas acerca da ciência, inclusive o anticientificismo. A ciência deve ser respeitada e não adorada ou ignorada, portanto, o processo pelo qual o aluno precisa passar é semelhante ao processo de desenvolvimento histórico da própria ciência (BARROS; CARVALHO, 1998).

SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVA

➤ PLANO DE AULA 01: APLICAÇÃO DA ATIVIDADE DIAGNÓSTICA E APRESENTAÇÃO DO DIÁRIO DE BORDO E DA QUESTÃO-PROBLEMA.

Objetivos específicos: diferenciar metodologias de ensino ativas e tradicionais; reconhecer a importância da autonomia e do protagonismo durante o processo de ensino e aprendizagem; identificar os erros como oportunidade de reflexão e construção de novas habilidades que propiciem soluções de questões-problema.

Objetivo específico do professor: identificar os conhecimentos preexistentes dos alunos sobre o conceito de luz, que permitam nortear e adequar a SEI para viabilizar a resolução da situação-problema.

Descrição da atividade: na primeira aula é explicado o que é uma sequência de ensino investigativa, enfatizando a importância de os alunos participarem e realizarem todas as atividades propostas. Após esse momento inicial os estudantes respondem a avaliação diagnóstica. Ao terminarem de responder o questionário, a questão-problema da SEI é apresentada para que os estudantes reflitam sobre ela ao longo da sequência.

Procedimentos:

- [1] Explicar a metodologia utilizada e apresentar o cronograma das atividades investigativas.
- [2] Aplicar a avaliação diagnóstica com as perguntas ([APÊNDICE B – Atividade diagnóstica](#)):
A) Quais conceitos físicos que você já estudou que você relaciona com a luz? B) Como você explicaria o conceito de luz para alguém? C) Por que você acha que o céu é azul? D) O que você entende por efeito fotoelétrico?
- [3] Apresentar o diário de bordo ([APÊNDICE A – Diário de Bordo](#)).
- [4] Apresentar a questão-problema da SEI.

➤ PLANO DE AULA 02: ATIVIDADE INVESTIGATIVA SOBRE A DISPERSÃO E O ESPALHAMENTO DA LUZ.

Objetivo específico: compreender os fenômenos de dispersão (Figura 1) e espalhamento da luz (Figura 2) através de experimentos de baixo custo e relacioná-los com fenômenos naturais presentes no cotidiano.

Questões norteadoras: A) Quais os fatores interferem nos resultados obtidos no experimento da dispersão da luz? B) Qual cor sofreu o maior desvio e qual sofreu o menor? C) Quais os

fatores interferem no resultado obtido no experimento do espalhamento da luz? D) Você consegue relacionar os experimentos com fenômenos que já observou? E) Por que você acha que acontece isso com a luz? F) Como você explicaria a luz a partir das atividades?

Descrição da atividade: os alunos realizam a atividade em grupos (é recomendado cinco integrantes), em que cada grupo realizará dois experimentos, um sobre a dispersão da luz (Figura 1) e o outro sobre o espalhamento da luz (Figura 2). Após a realização dos experimentos o grupo se reunirá para discutir e levantar hipóteses sobre o que aconteceu nas atividades. O grupo elaborará uma explicação para cada um dos experimentos. Individualmente, o aluno fará as anotações no seu diário de bordo.

Materiais necessários:

- **Experimento de dispersão da luz:** vasilha com água, espelho, cartolina branca e luz solar.

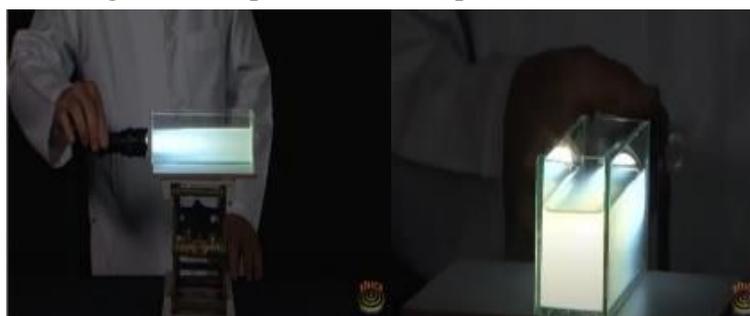
Figura 1 - Experimento da dispersão da luz



Fonte: Elaboração própria (2018).

- **Experimento do espalhamento da luz:** vasilha transparente, água, leite e luz branca.

Figura 2 - Experimento do espalhamento da luz



Fonte: Canal Física Universitária. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=sDcWsx00O48>. Acesso em 10 dez. 2021.

➤ **PLANO DE AULA 03: LEITURA DE FRAGMENTOS HISTÓRICOS EXTRAÍDOS DE TEXTOS CIENTÍFICOS SOBRE A TEORIA DA LUZ DE NEWTON.**

Objetivos específicos: identificar as variáveis que influenciaram o experimento do prisma realizado por Isaac Newton; relacionar o experimento de dispersão da luz realizado na Aula 02 com os fragmentos do texto.

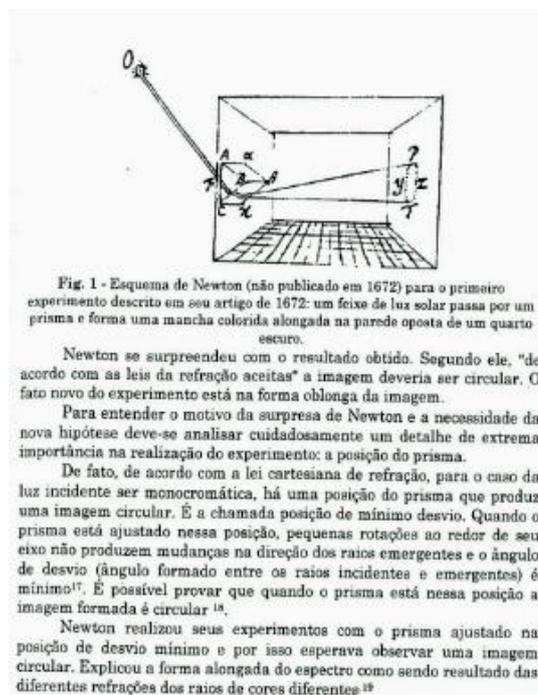
Objetivo específico do professor: aproximar os alunos de textos científicos e a partir deles compreender a teoria corpuscular proposta por Newton.

Questões norteadoras: A) Quais fatores foram importantes para que o Newton realizasse esse experimento? B) Como você descreveria a luz a partir dos fragmentos desse texto? C) Relacionando os fragmentos dos textos com o experimento da dispersão da luz, qual seria o raio de luz mais refringente e qual seria o menos? Justifique a sua resposta com o que você analisou na AI anterior.

Descrição da atividade: Os fragmentos são lidos individualmente, após a leitura o aluno elabora respostas para as questões norteadoras. Depois de responderem as perguntas, os estudantes se reúnem em grupos para compartilhar as respostas e elaborar uma resposta única do grupo. Toda a atividade é registrada no diário de bordo do aluno.

Materiais: fragmentos dos textos de Silva e Martins (Figura 3): “A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke” (1996) e “As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica” (2015).

Figura 3 - Fragmentos sobre o experimento do prisma



Logo depois de descrever esses experimentos, Newton registrou um comentário que certamente *não é consequência* dos mesmos: "Quanto mais uniformemente os glóbulos movem os nervos ópticos, mais os corpos parecem ser coloridos vermelho, amarelo, azul, verde etc.; mas quanto mais diversamente eles os movem, mais os corpos aparecem branco, negro ou cinza" [89]. Percebe-se que Newton estava tanto realizando experimentos quanto tentando compreender a natureza microscópica da luz e das cores.

Na página seguinte do caderno de anotações Newton registrou, sob a forma de tópicos numerados, um primeiro esboço da teoria sobre as cores [90]. A ideia principal dessa teoria (que depois foi abandonada por ele) era que os raios luminosos eram constituídos por partículas (glóbulos) que atingem os olhos, produzindo as diversas sensações de cores; haveria raios luminosos de diferentes velocidades; e os mais lentos seriam mais facilmente desviados (refratados) do que os mais rápidos. Relacionando essa proposta teórica com as observações feitas com o prisma, utilizando a hipótese de que os raios mais lentos sofrem maiores refrações, Newton concluiu que os raios mais lentos são os que produzem as cores azul, cor celeste e púrpura; os mais rápidos, vermelho e amarelo; e os de velocidade intermediária produzem o verde. Supôs também que uma mistura de raios rápidos e lentos produz branco, cinza e preto.

Fonte: A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke (SILVA e MARTINS, 1996) e As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica (SILVA e MARTINS, 2015).

Texto integral disponibilizado para a turma no drive do Google no sítio eletrônico:

https://drive.google.com/drive/folders/1bkys7_dgilVq1Bt4eQaevV4Ivff4bvxB?usp=sharing.

➤ **PLANO DE AULA 04: ATIVIDADE INVESTIGATIVA DO EXPERIMENTO DA DUPLA FENDA.**

Objetivo específico: propor hipóteses para a natureza da luz a partir do experimento de dupla fenda, relacionando essa atividade com o fenômeno observado em ondas na água.

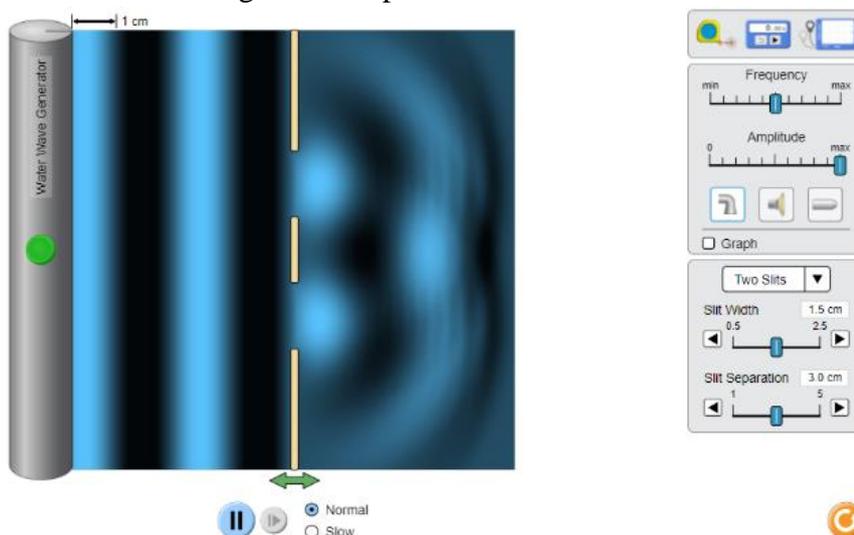
Questões norteadoras: (A) Você consegue relacionar as duas atividades investigativas? (B) Quais as diferenças encontradas entre os experimentos? (C) Quais as semelhanças entre as duas atividades? (D) Como você explicaria a atividade do simulador e o experimento?

Descrição da atividade: Primeiro, em duplas, os estudantes realizam a simulação sobre interferência das ondas, captura de tela ilustrada na Figura 4, no simulador virtual Physics Education Technology Project (PhET) – roteiro no ([APÊNDICE E – Atividade no Simulador de ondas do PhET](#)). Ao finalizarem a atividade, os grupos (formados desde a Aula 02) se reúnem novamente para a realização da prática experimental da dupla fenda com materiais de baixo custo (Figura 5).

Materiais utilizados:

- **Simulação de interferência de ondas:** Dispositivo eletrônicos e simulador virtual do PhET.

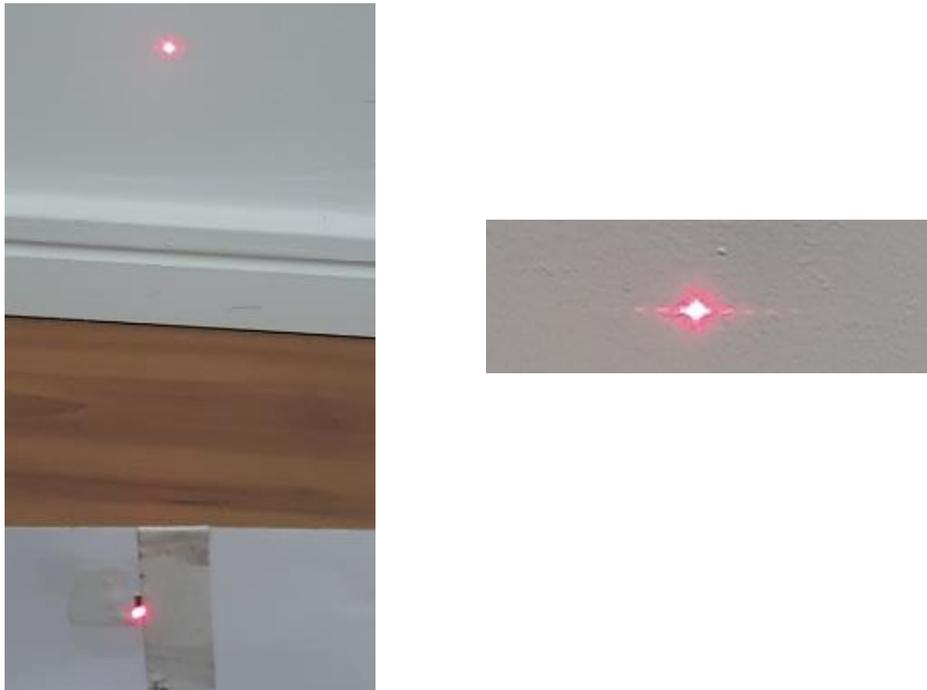
Figura 4 - Captura de tela do simulador PhET



Fonte: PhET. Disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/wave-interference>. Acesso em 12 dez. 2021.

- **Experimento da dupla fenda:** laser pointer, papel cartão, palha de aço, tesoura e fita isolante.

Figura 5 - Experimento da dispersão da luz



Fonte: Elaboração própria (2021).

➤ **PLANO DE AULA 05: LEITURA DE FRAGMENTOS HISTÓRICOS SOBRE A TEORIA ONDULATÓRIA DE HUYGENS.**

Objetivo específico: aproximar os alunos de textos científicos a fim de compreender a evolução histórica da natureza da luz.

Questões norteadoras: A) Como você identifica a luz na teoria de Huygens? B) Como você definiria a natureza da luz a partir dos argumentos de Newton e de Huygens? C) Lendo o fragmento, você consegue associar esse experimento a algum que você já realizou? D) Como você define a luz após essa leitura?

Descrição da atividade: os fragmentos são lidos individualmente, após a leitura o aluno elabora respostas para as questões norteadoras. Depois de responderem as perguntas, os estudantes se reúnem em grupos para compartilhar as suas respostas e elaborar uma resposta do grupo. Toda a atividade é registrada no diário de bordo do aluno.

Materiais utilizados: fragmento do texto extraídos da página 152, 153, 155 e 156 “A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos” de Silva (2007), conforme ilustração na Figura 6.

Figura 6 - Fragmentos sobre a evolução histórica da teoria ondulatória da luz

3. O tratado da luz

O Tratado da Luz de Huygens [2] é dividido em 6 capítulos. Para efeito deste artigo, será suficiente ater-se ao primeiro capítulo, denominado *Raios Diretamente Espalhados*, o qual apresenta alguns pressupostos e discute a natureza e as propriedades gerais da luz. Os demais versarão sobre a reflexão, a refração, a refração no ar, a birrefringência da calcita e um método para determinar as figuras produzidas por espelhos e lentes.

O capítulo I inicia-se com uma declaração que vincula o trabalho à tradição geométrica da física desenvolvida no Renascimento [11]:

As demonstrações que se referem à óptica, assim como em todas as ciências nas quais a geometria é aplicada à matéria, são fundadas em verdades extraídas da experiência: tais são que os raios de luz se propagam em linha reta; que os ângulos de reflexão e de

Quanto à natureza da luz, afirma não duvidar que consista no movimento de alguma espécie de matéria, quer se considere sua produção, quer seus efeitos. Na Terra, a principal fonte é o fogo e a chama que o gera, os quais contêm corpos em movimento rápido, pois dissolvem e fundem diversos outros corpos dos mais sólidos. No que se refere aos efeitos, se a luz for concentrada por meio de espelhos côncavos, apresenta justamente essa propriedade de queimar como o fogo, isto é, de separar as partes dos corpos. Isso lhe confere, portanto, a marca de movimento, pelo menos no âmbito do que para ele seria a verdadeira Filosofia, na qual todos os efeitos naturais são concebidos por razões mecânicas. Acrescenta ainda que se deve proceder dessa forma ou renunciar a toda esperança de compreender qualquer coisa em física, ou seja, deve-se adotar o modelo mecânico como a única alternativa possível.

Com respeito ao caráter ondulatório, ele faz uma analogia com as ondas sonoras no ar, que são mecânicas e longitudinais [12]:

Sabemos que por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em torno do local em que é produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte a outra do ar, e que a extensão desse movimento se faz com igual velocidade por todos os lados, formando-se como ondas esféricas que se alargam permanentemente e vêm tocar nosso ouvido. Ora, não há qualquer dúvida que a luz venha também de corpos luminosos até nós por meio de algum movimento impresso à matéria entre os dois, pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passaria de um a outro.

Fonte: A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos (SILVA, 2007).

Texto integral disponibilizado para a turma no drive do *Google* no sítio eletrônico:

https://drive.google.com/drive/folders/1bkys7_dgilVq1Bt4eQaevV4Ivff4bvxB?usp=sharing.

➤ PLANO DE AULA 06: SISTEMATIZAÇÃO DAS ATIVIDADES INVESTIGATIVAS (AIS) – PARTE 01.

Objetivo específico: caracterizar as grandezas físicas ondulatórias como frequência, comprimento de onda e velocidade; resolver situações-problema que envolvam as variáveis de frequência, comprimento de onda; identificar e diferenciar os fenômenos ondulatórios de refração, reflexão, difração e interferência nos fenômenos observados no dia a dia.

Descrição da atividade: aula expositiva e dialogada para reforçar os conteúdos construídos durante as AIs e apresentar uma linguagem mais formal aos estudantes. Durante a aula são sistematizados os fenômenos de refração, reflexão, difração e interferência observados nas atividades experimentais. Apresenta-se o formalismo matemático.

➤ PLANO DE AULA 07: DEBATE SOBRE AS TEORIAS DE NEWTON E HUYGENS.

Objetivo específico: elaborar argumentos para defender a teoria corpuscular de Newton e a ondulatória de Huygens com base nos experimentos e artigos lidos.

Descrição da atividade: os grupos apresentam suas hipóteses para explicar os três experimentos realizados e propõem argumentos de defesa para a teoria de Newton e de Huygens. Cada grupo terá 10 minutos para apresentar as suas conclusões e 5 minutos para contra-argumentar. A professora realiza novos questionamentos durante as explicações para que os estudantes reflitam e elaborem novas hipóteses e construam novos argumentos, propiciando a construção de novos conhecimentos.

➤ PLANO DE AULA 08: ATIVIDADE INVESTIGATIVA DE SIMULAÇÃO SOBRE O EFEITO FOTOELÉTRICO.

Objetivo específico: identificar as variáveis que influenciam o efeito fotoelétrico e propor hipóteses para explicar esse fenômeno a partir do que foi observado na simulação.

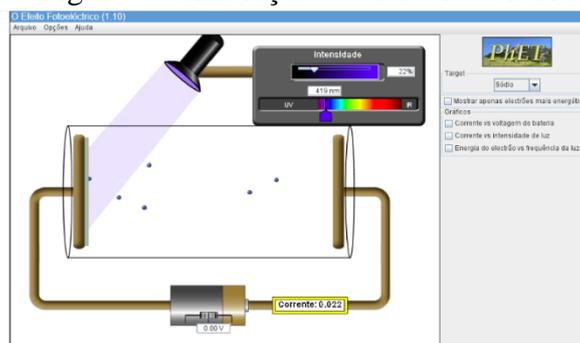
Descrição da atividade: os estudantes são divididos em duplas para observar os fatores que influenciam na simulação do efeito fotoelétrico (Figura 7). Durante a atividade os estudantes alteram os materiais, a intensidade e a frequência das ondas eletromagnéticas. Nessa AI é possível analisar os dados quantitativos através dos gráficos.

Materiais necessários: simulador virtual Physics Education Technology Project (PhET).

Procedimentos:

- [1] Realizar as etapas do roteiro ([APÊNDICE F - Roteiro da Simulação do Efeito Fotoelétrico](#)).
- [2] Elaborar hipóteses para explicar o fenômeno observado na simulação, identificando as variáveis que o influenciam.
- [3] Propor em grupo explicações para descrever o efeito elétrico a partir do que observaram na simulação.

Figura 7 - Simulação do efeito fotoelétrico



Captura da simulação do PhET. Disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/photoelectric>. Acesso 12 dez. 2021.

➤ **PLANO DE AULA 09: SISTEMATIZAÇÃO DAS ATIVIDADES INVESTIGATIVAS (AIS) – PARTE 02.**

Objetivo específico: elaborar explicações para o comportamento da luz a partir de todas as atividades desenvolvidas na SEI, com o intuito de responder a questão-problema “Como podemos definir a natureza da luz?”.

Descrição da atividade: os grupos elaboram hipóteses e apresentam as suas explicações para responder a questão-problema. A professora realiza novos questionamentos durante as explicações para que os estudantes reflitam e elaborem novas hipóteses e construam novos argumentos, propiciando a construção de novos conhecimentos.

➤ **PLANO DE AULA 10: TEXTO PRÓPRIO SOBRE A CONSTRUÇÃO HISTÓRICA DA TEORIA QUÂNTICA.**

Objetivo específico: compreender o problema da radiação do corpo negro e a sua contribuição para o desenvolvimento da teoria quântica.

Descrição da atividade: a leitura do texto é realizada de forma individual e ao final os estudantes fazem um fichamento com as ideias centrais do material. Após a realização do fichamento, os estudantes apresentam as suas dúvidas acerca do texto e realiza-se a discussão a respeito do que foi compreendido sobre a evolução dos conceitos e a natureza da ciência.

Materiais necessários: texto da Evolução Histórica do Surgimento da Teoria Quântica ([APÊNDICE G – Texto de Sistematização](#)).

PLANO DE AULA 11: ELABORAÇÃO DA MOSTRA CULTURAL E CIENTÍFICA.

Objetivo específico: sistematizar os conhecimentos construídos a partir da SEI e divulgá-los para a comunidade escolar.

Descrição da atividade: os grupos organizam uma mostra cultural e científica para divulgar à comunidade escolar os conhecimentos construídos sobre a luz e a sua natureza. Os estudantes podem escolher entre apresentações em pôsteres ou artísticas. Uma parte dos estudantes apresentam em estandes e os outros no palco, de acordo com a proposta apresentada pelo grupo. Nessa atividade os próprios estudantes serão os responsáveis pela mostra, tendo a comissão de organização com o coordenador geral, o coordenador das apresentações em estande, coordenador das apresentações artísticas e coordenadores dos grupos.

Materiais necessários: escolha dos estudantes.

PLANO DE AULA 12: MOSTRA CULTURAL E CIENTÍFICA – EXPOSIÇÃO E APRESENTAÇÕES.

Objetivo específico: Divulgar os conhecimentos construídos durante a SEI.

Descrição da atividade: será realizada uma mostra cultural e científica para que os estudantes apresentem os seus trabalhos que podem ser em estande ou no palco, essa atividade será a culminância da SEI. Nesse momento os alunos compartilham o que aprenderam com a sequência de ensino investigativa, e o professor pode avaliar se esta propiciou o desenvolvimento de conhecimentos adequados e promoveu a cultura científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUNER, Jerome Seymour. **Uma nova teoria de aprendizagem**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bloch, 1976.

BRUNER, Jerome Seymour. **Sobre a Teoria da Instrução**. São Paulo: Ph Ltda., 2006.

BARROS, Marcelo Alves; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. A história da ciência iluminando o ensino de visão. **Revista Ciência & Educação**, v.5, n.1, p. 83–94, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-73131998000100008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/bsMxsFJvBgvF7zTtFXWzqqv/abstract/?lang=pt>. Acesso em 17 jan. 2023.

CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. O ensino de ciências e a proposição de sequências de ensino investigativas. In CARVALHO, A. M. P. (Org.), **Ensino de ciências por investigação: condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2020.

FÍSICA UNIVERSITÁRIA. **Experimentos - Espalhamento da luz**. YouTube, 3 jun. 2016. Disponível em: https://www.youtube.com/playlist?list=PL1Dg4Oxxk_RIw4M-bT9bgTIv4MMBth-ln. Acesso em 10 dez. 2021.

GAMA, Leonardo Pereira. **O estudo da natureza da luz: uma introdução à física quântica na 2ª série do ensino médio**. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional de Ensino de Física) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

MARTINS, Roberto de Andrade. Introdução: A História das Ciências e seus usos na Educação. In SILVA, C. C. (Org.), **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

MARTINS, Roberto de Andrade; SILVA, Cibelle Celestino. As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4202-1-4202-32, 2015. Tradução. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173731817>. Acesso em: 11 jan. 2022.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de aprendizagem**. 2 ed. São Paulo: E.P.U, 2019.

ORTEGA, Daniel; MOURA, Breno Arsioli. Uma abordagem histórica da reflexão e da refração da luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20190114, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0114>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/BXDnH3HCJWntNSXpNNh7qjz/?lang=pt>. Acesso em: 26 dez. 2022.

PHET. **Interactive Simulations da Universidade do Colorado**. 2016. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/about. Acesso em: 14 dez. 2021.

SASSERON, Lúcia Helena; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Almejando a alfabetização científica no ensino fundamental: a proposição e a procura de indicadores do processo.

Investigações em Ensino de Ciências, v. 13, n.3, p.333-352, 2008. Disponível em <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/445>. Acesso em: 20 ago. 2022.

SASSERON, Lúcia Helena. Alfabetização científica e documentos oficiais brasileiros: um diálogo na estruturação do ensino de física. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de física**. São Paulo: Cengage Learning, 2018.

SASSERON, Lúcia Helena. Interações discursivas e investigação em sala de aula: o papel do professor. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de ciências por investigação: condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2020.

SILVA, Cibele Celestino; MARTINS, Roberto de Andrade. A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke. **Atas do V Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física**. Belo Horizonte: UFMG/CECIMI G/FAE, 1997, p. 230-7.

SILVA, Fabio W.O. da. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 149-159, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000100021>.

VYGOTSKY, L. S. **A Formação Social da Mente**. 4.ed brasileira. São Paulo: Martins Fontes, 1991. 168 p.

APÊNDICE A – Diário de Bordo

Diário de bordo
Nome:
Turma:
Grupo:
Atividade realizada:
Data de realização:
Materiais utilizados:
Resultados encontrados:
Problemas na execução da atividade:
Hipóteses levantadas:

Análise dos resultados:

Conclusão da atividade (individual):

APÊNDICE B – Atividade diagnóstica

Aluno (a): _____ **Turma:** _____

[1] Quais conceitos físicos estudados você relaciona com a luz?

[2] Como você explicaria o conceito de luz para alguém?

[3] Por que você acha que o céu é azul?

[4] O que você entende por efeito fotoelétrico?

APÊNDICE C – Fragmentos de textos científicos sobre Newton

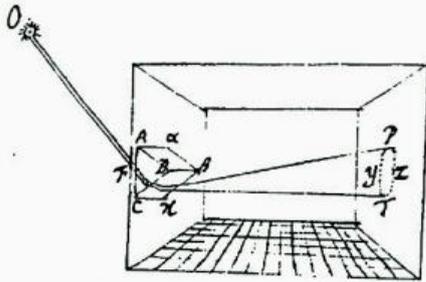


Fig. 1 - Esquema de Newton (não publicado em 1672) para o primeiro experimento descrito em seu artigo de 1672: um feixe de luz solar passa por um prisma e forma uma mancha colorida alongada na parede oposta de um quarto escuro.

Newton se surpreendeu com o resultado obtido. Segundo ele, "de acordo com as leis da refração aceitas" a imagem deveria ser circular. O fato novo do experimento está na forma oblonga da imagem.

Para entender o motivo da surpresa de Newton e a necessidade de uma nova hipótese deve-se analisar cuidadosamente um detalhe de extrema importância na realização do experimento: a posição do prisma.

De fato, de acordo com a lei cartesiana de refração, para o caso de luz incidente ser monocromática, há uma posição do prisma que produz uma imagem circular. É a chamada posição de mínimo desvio. Quando o prisma está ajustado nessa posição, pequenas rotações ao redor de seu eixo não produzem mudanças na direção dos raios emergentes e o ângulo de desvio (ângulo formado entre os raios incidentes e emergentes) é mínimo¹⁷. É possível provar que quando o prisma está nessa posição a imagem formada é circular¹⁸.

Newton realizou seus experimentos com o prisma ajustado na posição de desvio mínimo e por isso esperava observar uma imagem circular. Explicou a forma alongada do espectro como sendo resultado das diferentes refrações dos raios de cores diferentes¹⁹.

Logo depois de descrever esses experimentos, Newton registrou um comentário que certamente *não é consequência* dos mesmos: "Quanto mais uniformemente os glóbulos movem os nervos ópticos, mais os corpos parecem ser coloridos vermelho, amarelo, azul, verde etc.; mas quanto mais diversamente eles os movem, mais os corpos aparecem branco, negro ou cinza" [89]. Percebe-se que Newton estava tanto realizando experimentos quanto tentando compreender a natureza microscópica da luz e das cores.

Na página seguinte do caderno de anotações Newton registrou, sob a forma de tópicos numerados, um primeiro esboço da teoria sobre as cores [90]. A ideia principal dessa teoria (que depois foi abandonada por ele) era que os raios luminosos eram constituídos por partículas (glóbulos) que atingem os olhos, produzindo as diversas sensações de cores; haveria raios luminosos de diferentes velocidades; e os mais lentos seriam mais facilmente desviados (refratados) do que os mais rápidos. Relacionando essa proposta teórica com as

Perguntas sobre o texto

- Quais fatores foram importantes para que o Newton realizasse esse experimento?
- Como você descreveria a luz a partir dos fragmentos desse texto?
- Relacionando os fragmentos dos textos com o experimento da dispersão da luz, qual seria o raio de luz mais refringente e qual seria o menos? Justifique a sua resposta com o que você analisou na AI anterior.

APÊNDICE D – Fragmentos de textos científicos sobre Huygens

3. O tratado da luz

O Tratado da Luz de Huygens [2] é dividido em 6 capítulos. Para efeito deste artigo, será suficiente ater-se ao primeiro capítulo, denominado *Raios Diretamente Espalhados*, o qual apresenta alguns pressupostos e discute a natureza e as propriedades gerais da luz. Os demais versarão sobre a reflexão, a refração, a refração no ar, a birrefringência da calcita e um método para determinar as figuras produzidas por espelhos e lentes.

O capítulo I inicia-se com uma declaração que vincula o trabalho à tradição geométrica da física desenvolvida no Renascimento [11]:

As demonstrações que se referem à óptica, assim como em todas as ciências nas quais a geometria é aplicada à matéria, são fundadas em verdades extraídas da experiência: tais são que os raios de luz se propagam em linha reta; que os ângulos de reflexão e de refração são iguais e que nas refrações o raio é quebrado de acordo com a regra dos senos, bem conhecida e não menos correta que as precedentes.

Quanto à natureza da luz, afirma não duvidar que consista no movimento de alguma espécie de matéria, quer se considere sua produção, quer seus efeitos. Na Terra, a principal fonte é o fogo e a chama que o gera, os quais contêm corpos em movimento rápido, pois dissolvem e fundem diversos outros corpos dos mais sólidos. No que se refere aos efeitos, se a luz for concentrada por meio de espelhos côncavos, apresenta justamente essa propriedade de queimar como o fogo, isto é, de separar as partes dos corpos. Isso lhe confere, portanto, a marca de movimento, pelo menos no âmbito do que para ele seria a verdadeira Filosofia, na qual todos os efeitos naturais são concebidos por razões mecânicas. Acrescenta ainda que se deve proceder dessa forma ou renunciar a toda esperança de compreender qualquer coisa em física, ou seja, deve-se adotar o modelo mecânico como a única alternativa possível.

Com respeito ao caráter ondulatório, ele faz uma analogia com as ondas sonoras no ar, que são mecânicas e longitudinais [12]:

Sabemos que por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em torno do local em que é produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte a outra do ar, e que a extensão desse movimento se faz com igual velocidade por todos os lados, formando-se como ondas esféricas que se alargam permanentemente e vêm tocar nosso ouvido. Ora, não há qualquer dúvida que a luz venha também de corpos luminosos até nós por meio de algum movimento impresso à matéria entre os dois, pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passaria de um a outro.

Perguntas sobre o texto

- A. Como você identifica o conceito luz na teoria de Huygens?
- B. Como você definiria a natureza da luz a partir dos argumentos de Newton e de Huygens?
- C. Lendo o fragmento, você consegue associá-lo a algum experimento que realizou?
- D. Como você definiria a luz após essa leitura?

APÊNDICE E – Atividade no Simulador de ondas do PhET

CEPMG – UNIDADE FORMOSA – DOMINGOS DE OLIVEIRA

Série: 2ª série

Data: __/__/2022

Turma: Energia que nos move

Professor: Nayana Souza

Disciplina: Física

Passo 1. Acesse o link

<https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html>

Passo 2. Clique em “Waves” e depois no ícone da onda na água:



Passo 3. Clique em “Side View” (Vista Lateral) e observe como estão sendo geradas as ondas na água.

Passo 4. Explore a simulação, observe o que acontece quando você aumenta e depois quando diminui a frequência (frequency).

Passo 5. Analise o que acontece quando você aumenta e depois diminui a amplitude.

Passo 6. Coloque o gráfico (Graph) e refaça os passos 04 e 05.

Passo 7. Clique em “Top View” (Vista de cima) e pense como você diferencia as cristas e os vales dessas ondas.

Passo 8. Clique nesse símbolo para observar o comportamento da luz na simulação.



Passo 9. Clique em “screen” (tela) antes de emitir os feixes luminosos. Descreva como a imagem está sendo formada na tela.

Passo 10. Altere a frequência (frequency) e observe o que muda na tela.

Passo 11. Observe na tela o que acontece quando aumenta e depois quando diminui a amplitude.

Passo 12. Coloque o gráfico (Graph) e refaça os passos 10 e 11.

Passo 13. Clique no ícone “Interference”.



Passo 14. Clique em “screen” (tela) e observe como a imagem é formada antes e depois da emissão dos feixes de luz.

Passo 15. Aumente e diminua a distância entre as lanternas.



Passo 16. Pense em explicações para o que está acontecendo na tela.

Passo 17. Repita os passos 13, 14 e 15 com a simulação da onda na água.



APÊNDICE F - Roteiro da Simulação do Efeito Fotoelétrico

CEPMG – UNIDADE FORMOSA – DOMINGOS DE OLIVEIRA

Série: 2ª série

Data: __ / __ / 2022

Turma: Energia que nos move

Professor: Nayana Souza

Disciplina: Física

- a) Acessar o link <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric&locale=pt>
- b) Aumentar a intensidade da onda eletromagnética aos poucos para observar o que acontecerá com os elétrons.
- c) Fixar a intensidade e modificar o comprimento de onda (desde o ultravioleta até o infravermelho).
- d) Observar os fatores que influenciam no aumento ou na diminuição da corrente elétrica.
- e) Alterar os materiais (em target) para observar se os elétrons são arrancados da mesma maneira.
- f) Algum dos materiais emitiu elétrons com a incidência na faixa do infravermelho (IV)?
- g) Todos os materiais emitiram radiação da mesma forma quando submetidos a um mesmo comprimento de onda e intensidade?
- h) Elaborar hipóteses para explicar o fenômeno observado na simulação, identificando as variáveis que o influenciam.
- i) Propor em grupo (quatro pessoas) explicações para descrever o efeito fotoelétrico a partir do que observaram na simulação.

APÊNDICE G – Texto de Sistematização

EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO SURGIMENTO DA TEORIA QUÂNTICA

A física quântica nasce a partir dos questionamentos sobre o desconhecido espectro da radiação térmica e da descoberta de novas radiações, sua origem está entrelaçada à origem da química quântica. O marco do desenvolvimento da mecânica quântica é a descoberta dos raios catódicos.

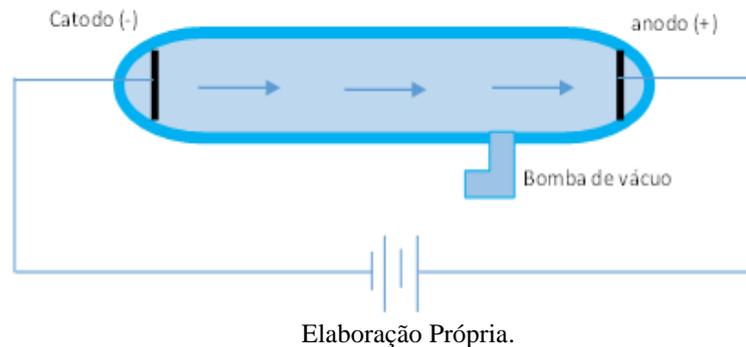
Mas o que são raios catódicos? Provavelmente você já utilizou equipamentos reprodutores de imagem, tais como televisor, monitor de computador, tela de radar, dentre outros, não é mesmo?! Os tubos de raios catódicos são os dispositivos responsáveis por gerar essas imagens. Vamos ver como eles foram descobertos? E qual a contribuição dele para o desenvolvimento da física quântica?

Raios Catódicos

Quem iniciou os estudos sobre raios catódicos foi Michael Faraday, um grande físico experimentalista inglês, em 1838. Considerado um dos maiores cientistas experimentais, propiciou grandes contribuições à física, em especial na área do eletromagnetismo, e à química. Nas suas experiências em química, conseguiu liquefazer, ou seja, passar do estado gasoso para o líquido, gases que nunca tinham sido liquefeitos. Para isso, foram necessárias determinadas condições de temperatura e pressão, já que nas condições normais de temperatura e pressão, esses gases liquefeitos estão na forma gasosa. Então, em seus estudos sobre gases, Faraday aplicou uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre gases a baixas pressões (gases rarefeitos), o que proporcionou a pesquisa dos raios catódicos.

Um dos problemas para o avanço dos estudos sobre raios catódicos foi a dificuldade de soldar materiais com coeficientes de dilatação diferentes, neste caso, vidro e metal. Em 1855, um alemão que trabalhava com vidros, Heinrich Geissler, construiu tubos de vidros selados com uma bomba de vácuo de mercúrio (como era um metal líquido, ajudava na vedação) para retirar o ar e regular a pressão dentro do tubo (Conforme figura 1), podendo também retirar todo o ar e inserir um outro gás. Nesses tubos não havia vácuo porque o gás sempre estava a uma dada pressão.

Figura 1 - Tubo de Geissler

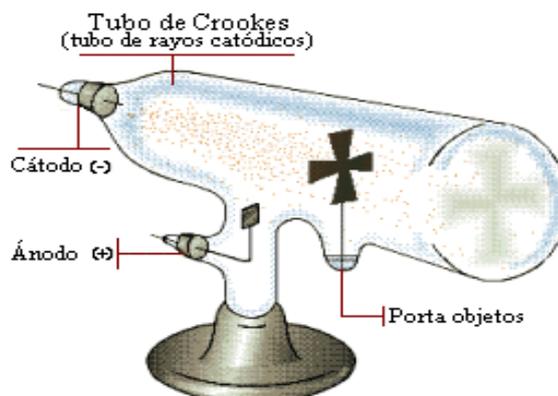


Era aplicada uma tensão alta ao tubo. Quando o gás estava numa pressão elevada, não havia passagem de corrente pelo tubo. Quando a pressão diminuía, até chegar a aproximadamente 40 mmHg, a corrente começava a fluir e surgia uma luminosidade que dependia do gás, da tensão e da pressão.

A partir desses estudos, em 1858, Julius Plücker, físico e matemático alemão, realizou vários experimentos para analisar os desvios dos raios catódicos. Ele descobriu que próximo ao catodo se formava uma luminescência esverdeada que variava com a posição do campo magnético.

No início da década de 1870, William Crookes, físico e químico britânico, desenvolveu tubos bem parecidos com o de Geissler. As diferenças consistiam no fato de que nos tubos de Crookes (Figura 2), eram colocadas ampolas de vidro com dois eletrodos, que permitia fazer o melhor vácuo possível; e a luminosidade não ficava entre o catodo e o anodo, e sim na parede do tubo oposta ao catodo.

Figura 2 - Tubo de Crookes



Fonte: Site A imagem comunica¹.

Após alguns anos, o físico Eugen Goldstein observou que a luminosidade era provocada por raios imperceptíveis a olho nu, que partiam do catodo e atravessavam em linha reta o tubo, nomeando-os de raios catódicos. Posteriormente, foram construídos catodos côncavos para produzir raios concentrados e dirigidos. E em 1878, Crookes concluiu que os raios catódicos possuíam cargas negativas e eram emitidos do catodo com velocidades altas. Dados que foram comprovados em 1879 por Joseph Jonh Thomson (Figura 3), responsável por demonstrar que as radiações desviadas aconteciam devido à ação de campos elétricos. Thomson, que a partir de então ficou conhecido como o pai do elétron, foi um grande físico britânico que, por não possuir muitas habilidades manuais, utilizou a sua capacidade matemática para solucionar questões da física teórica. Escreveu um artigo em 1981, precursor da teoria de Einstein; em 1897, descobriu as cargas elétricas negativas (elétron) e, por isso, recebeu o prêmio Nobel de Física em 1906.

Figura 3 - J. J. Thomson



Fonte: Wikimedia².

A descoberta de Thomson foi obtida por meio dos seus estudos sobre os raios catódicos. Na época havia duas hipóteses: a primeira defendia que os raios catódicos eram feitos de partículas eletrizadas, e a segunda afirmava que ambos eram distintos. Nos seus experimentos ele percebeu que podia alterar os raios com um ímã e com o campo elétrico, provando que os raios catódicos eram correntes de partículas que possuíam carga elétrica. Thomson dedicou os seus estudos a medir a massa relativa do elétron, encontrando o valor da massa de $1/2000$ de um átomo de hidrogênio e a velocidade de 256 000 km/s.

Notamos, então, a importância dos raios catódicos para o desenvolvimento da teoria quântica, porque foi devido ao estudo destes raios que se descobriu o elétron e houve o desenvolvimento da teoria atômica e, assim, foi possível medir a massa e a carga elétrica do elétron, que é muito importante para a Física Moderna.

Antes de avançarmos, vamos formalizar o conceito dos raios catódicos:

“são elétrons que são arrancados do catodo por causa da diferença de potencial e são atraídos pelo anodo, possuem velocidade alta, ou seja, possuem energia cinética”.

Você deve estar se perguntando por qual motivo emitem uma luminosidade, a resposta é que os elétrons dos raios catódicos possuem uma energia cinética alta que é perdida no choque com o vidro. Assim, os elétrons do átomo do vidro são acelerados e, por consequência, as cargas elétricas aceleradas emitem ondas eletromagnéticas. No caso do vidro, os comprimentos de onda estão nos valores visíveis da luz.

Ondas eletromagnéticas e o efeito fotoelétrico.

As ondas eletromagnéticas foram comprovadas matematicamente por James Clerk Maxwell, físico e matemático escocês. Seus estudos foram estabelecidos pelos dois princípios do eletromagnetismo, descritos pelos trabalhos de Oersted, Ampère, Henry e Faraday:

1-Uma corrente elétrica num condutor produz linhas de força magnéticas que envolvem o condutor; e

2-Quando um condutor se move através de linhas de força magnéticas que se criaram por meios exteriores ao condutor, induz-se uma corrente no condutor.

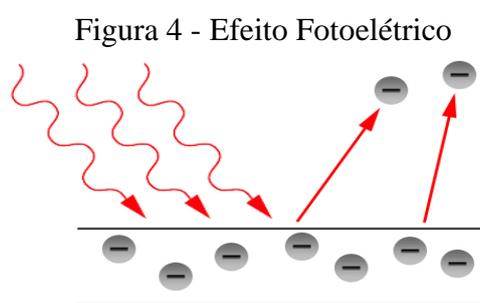
Maxwell começou o seu trabalho construindo uma formulação matemática para a Teoria de Faraday. Por de volta de 1860, ele desenvolveu uma teoria magnética do eletromagnetismo, em que os princípios se aplicavam aos campos magnéticos e elétricos existentes nos condutores, isoladores e até mesmo no espaço sem matéria. Maxwell construiu quatro equações que relacionavam o campo magnético com o campo elétrico, que passaram a ser a base do eletromagnetismo, essas fórmulas tinham potencialidades que permitiam abandonar o modelo mecânico. Além disso, trouxe uma ideia inovadora de que a variação do campo elétrico provoca o surgimento de um campo magnético, e que isso se aplica também ao espaço sem matéria, já que antes acreditava-se que apenas a corrente em um condutor gerava campo magnético.

James Clerk Maxwell também concluiu que a luz era uma onda eletromagnética e que elas poderiam existir com diferentes frequências, se propagando no vácuo com a velocidade da luz, cujo valor encontrado foi de 315.000.000 m/s. Contudo, somente em 1888, o físico alemão Heinrich Hertz conseguiu comprovar experimentalmente a existência das ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell sobre a propagação da luz.

Antes de falarmos sobre a descoberta do efeito fotoelétrico, é curioso saber que, durante a sua juventude, Hertz se interessava pelo estudo das humanidades e línguas, e somente após seu avô lhe dar alguns aparelhos, começou a sua investigação pela ciência, sendo que muitas das suas experiências foram feitas em um laboratório simples na sua casa. O físico dedicou seus

estudos ao eletromagnetismo e após as suas experiências sobre as ondas eletromagnéticas descobriu o efeito fotoelétrico.

Hertz notou que uma descarga entre dois eletrodos ocorre mais facilmente quando é incidido sobre eles luz ultravioleta. Já Philipp Lenard, físico alemão, verificou experimentalmente que quando eram incididos raios ultravioletas numa superfície do catodo, isso fazia com que os elétrons fossem emitidos pelo catodo, facilitando assim a descarga. Essa emissão de elétrons de uma superfície quando expostos a uma radiação eletromagnética de frequência alta é chamada de efeito fotoelétrico, representado na Figura 4.



Fonte: Site Wikimedia³.

O efeito parece simples, mas intrigou muitos pesquisadores da época pela impossibilidade de explicar esse fenômeno a partir da mecânica clássica. Somente em 1905, Einstein explicou efetivamente o efeito fotoelétrico, o que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1921. A teoria quântica de Einstein foi construída a partir da radiação do corpo negro de Planck. Essa descoberta do efeito fotoelétrico foi determinante para o estabelecimento da mecânica quântica.

Radiação térmica

A radiação térmica foi fundamental no desenvolvimento da teoria quântica, porque foi tentando descrevê-la teoricamente que Planck encontrou uma constante, posteriormente chamada de “constante de Planck”. Antes de falarmos de como a radiação propiciou a descoberta de Planck, vamos explicar o que é a radiação térmica.

Primeiro vamos nos questionar: o que fazemos quando estamos com frio? Provavelmente você já utilizou um cobertor. Mas você sabe o motivo disso? É o que iremos discutir agora:

Todos os corpos a certa temperatura emitem uma radiação eletromagnética. Isso porque a temperatura corresponde à agitação das moléculas que estão mudando constantemente de direção, ou seja, acelerando. Como moléculas são constituídas de cargas elétricas, as cargas elétricas também são aceleradas originando a radiação eletromagnética. Essa radiação emitida pelo corpo devido à temperatura é chamada radiação térmica.

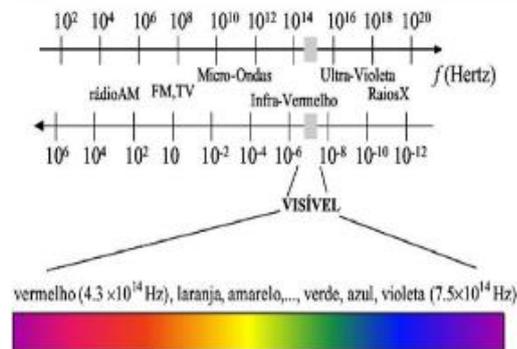
Os corpos emitem e absorvem essa radiação do meio que os cerca. Quando um corpo está mais quente que o meio ele irá esfriar, já que a sua taxa de emissão será maior que a de absorção. Quando o equilíbrio térmico é alcançado, as taxas de emissão e absorção serão iguais. Esse é o motivo pelo qual usamos o cobertor, dependendo do material, ele nos isolará do meio externo e entraremos em equilíbrio térmico com o novo meio, que é o cobertor, evitando a troca de calor com o meio externo.

O espectro de radiação do corpo independe da composição do material de que é feito, dependendo apenas da temperatura. A maior parte da radiação térmica, cerca de 90%, é feita na faixa do infravermelho e por isso é invisível a nós.

Você poderia então questionar: como nós vemos os objetos?

A resposta é que nós os enxergamos não pela luz que emitem, e sim pela luz que refletem, portanto, os corpos visíveis são muito quentes. Como exemplo, podemos citar o sol, que emite radiações térmicas tanto na faixa visível, quanto nas menores (infravermelho) e maiores (ultravioletas). Na Figura 5 é apresentado o espectro das ondas eletromagnéticas, conforme a frequência aumenta, o comprimento de onda diminui.

Figura 5 - Espectro das ondas eletromagnéticas



Fonte: Site InfoEnem⁴.

Quando a temperatura aumenta, o corpo emite mais radiação térmica. De maneira geral, o espectro de radiação térmica de corpos muito quentes depende de algum modo da matéria deles. Entretanto, há um tipo de corpo quente que emite um espectro universal, os chamados corpos negros. Esses corpos absorvem toda a radiação térmica incidida sobre ele, não refletindo a luz. Os corpos negros produzem radiação eletromagnética e quando aquecidos tornam-se excelentes emissores de radiação térmica.

Atividade – Debata com os colegas sobre a radiação térmica e depois escreva um texto sobre o que você entendeu sobre o assunto.

Radiação de Corpo Negro

Em 1853, o físico escocês William Ritch ao utilizar um termômetro diferencial, notou que existia uma taxa de proporcionalidade entre dois corpos radiantes quando chegavam ao equilíbrio térmico: a potência de emissividade e (quantidade de energia radiante emitida por unidade de tempo) e a absorção total a . Essa taxa é dada pela seguinte equação:

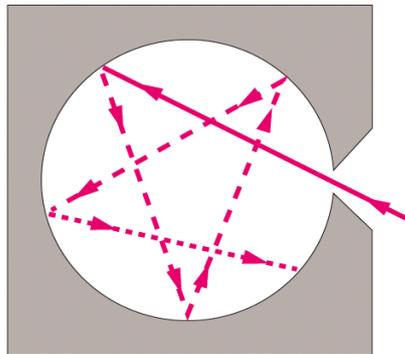
$$\frac{e_1}{a_1} = \frac{e_2}{a_2}$$

Como o corpo negro absorve toda a radiação térmica incidida sobre ele, temos que:

$$\frac{e_{CN}}{1} = \frac{e_2}{a_2}$$

Sendo assim, $e_{CN} > e_2$, o que mostra que um corpo negro possui uma potência emissiva maior em relação a outros corpos. Na prática, não existem corpos na natureza com essa característica, mas eles podem ser construídos. A forma mais comum é utilizando uma caixa vazia espelhada com um pequeno orifício, ilustrada na Figura 6. Incidindo uma radiação térmica pelo orifício, essa radiação será refletida pelos espelhos dentro da caixa até alcançar o equilíbrio térmico. Tendo em vista que o orifício é bem pequeno e dificilmente a radiação sairá por ele, toda a radiação será absorvida pela caixa.

Figura 6 - Radiação de corpo negro

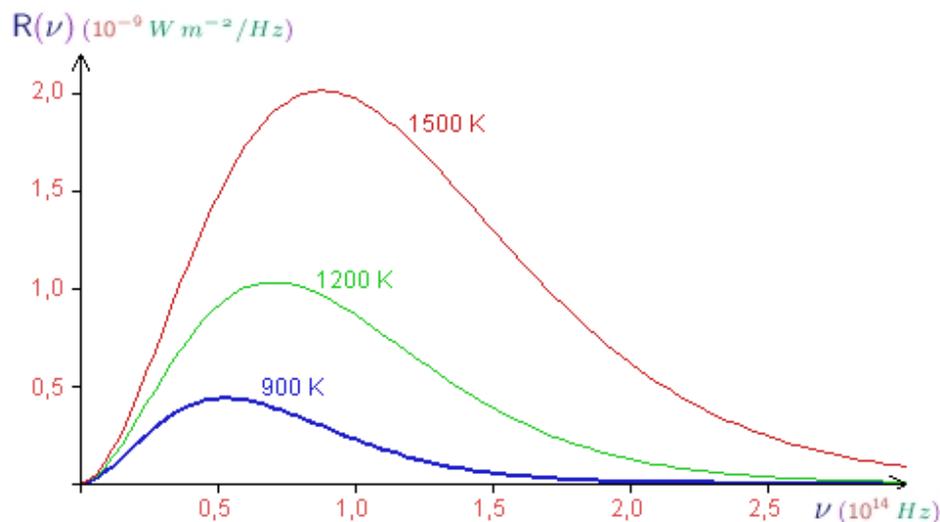


Fonte: Universidade do Porto, FE, Física Quântica 1⁵.

Se as paredes da caixa forem aquecidas uniformemente a certa temperatura, as paredes emitirão radiação térmica que preencherá a caixa, e a parte dessa radiação que for incidida pelo orifício irá atravessá-lo. Essa radiação emitida pelo buraco terá também o espectro de corpo negro. Como a radiação de um corpo negro depende somente da temperatura a que está submetido, então o comprimento de onda estará associado diretamente à temperatura; conforme a temperatura aumenta, a frequência aumenta e o comprimento de onda diminui.

Em temperatura ambiente, o corpo negro emite radiação infravermelha, mas ao ser aquecido a altas temperaturas, o comprimento de onda passa a ser visível, sendo a primeira cor a vermelho e a última a azul, e, em seguida, passa a emitir quantidades de ultravioletas. Corpos com pigmentação preta são exemplos de corpos quase negros, pois corpos perfeitamente negros não existem na natureza. Na Figura 7 é apresentado o gráfico de radiância espectral de corpo negro com base na temperatura em que está submetido.

Figura 7 - Radiância espectral do corpo negro



Fonte: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Radiação Térmica – Teoria de Planck⁶.

O primeiro a utilizar o termo “radiação do corpo negro”, em 1862, foi o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff. Em 1845, ele havia formulado as leis das malhas e dos nós que permitiam calcular a tensão e as correntes corretamente em circuitos elétricos, conhecidas como Leis de Kirchhoff. Em 1859, ele apresentou um trabalho que mostrava que corpos com raios de mesmo comprimento de onda e mesma temperatura possuíam a mesma razão entre a potência emissiva e a absorvidade, provando a veracidade da equação de Ritchie. Posterior a esse trabalho, lançou um artigo com a noção de “um corpo perfeitamente negro”, provando que a potência de emissividade depende somente da temperatura e da frequência de radiação.

Em 1884, baseando-se na crença que perdurou até 1890, de que os fenômenos físicos poderiam ser explicados pela mecânica clássica, termodinâmica e eletrodinâmica clássica, Boltzmann deduziu uma equação que relacionava a dependência da radiação do corpo negro com a temperatura. Partindo da teoria de James Maxwell encontrou o valor para a pressão de radiação como $p = U/3$. Ele comprovou o que Stefan, físico e matemático austro-esloveno, tinha concluído em 1879, que a energia total irradiada U por um corpo negro é proporcional à temperatura T elevada a quarta potência. Deduzindo a seguinte equação:

$$U = \sigma T^4,$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

Em 1893, o físico alemão Wilhelm Wien encontra uma segunda lei que também tenta relacionar a radiação do corpo negro com a temperatura, chamada lei de deslocamento. Essa função é a razão entre a frequência e a temperatura, partindo de que $\lambda T = cte$, em que λ é o comprimento de onda e T a temperatura. Em termos de comprimento de onda de radiação é possível escrevê-la como:

$$\rho(\lambda, T)\lambda^5 = cte \rightarrow \rho(\lambda, T) = \lambda^{-5}\varphi(\lambda T)$$

Contudo, essa função só conseguia ser obtida experimentalmente. Sendo assim, em 1896, Wien apresentou uma nova proposta, em que a distribuição de energia era similar às equações de Maxwell para a distribuição da velocidade de moléculas de gás, sendo $\varphi(\lambda T) = A \exp(-\frac{B}{\lambda T})$, com A e B positivos ou $f(\frac{v}{T}) = \alpha \exp(-\beta \frac{v}{T})$. Em 1899, foram realizados experimentos na faixa visível, e em 1900, na faixa do infravermelho, ambos mostraram que para grandes comprimentos de onda e altas temperaturas, a lei de Wien estava incorreta.

No mesmo ano, Lord Rayleigh (William Strutt), encontrou problemas na região ultravioleta do espectro. Para resolver o problema baseou-se na mecânica estatística clássica de Maxwell-Boltzmann, o princípio da equipartição da energia, $\bar{\mathcal{E}} = kT$, e encontrou uma equação bem diferente da de Wien. Em 1905, James Jeans contribuiu com um fator que Rayleigh tinha esquecido e a equação de Jeans-Rayleigh para a distribuição de energia em altas temperaturas foi dada como:

$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

Só que essa função apresentava problemas para o limite de altas frequências, o que foi mostrado por Albert Einstein posteriormente, e ficou conhecido como “*Catástrofe ultravioleta*”. O que acabou colocando o princípio de equipartição em dúvida já que a equação foi derivada deste.

Radiação de Corpo Negro de Planck

Quem deu a largada inicial a teoria quântica foi Max Karl Ernst Ludwig Planck (Figura 8), um físico alemão. As suas grandes contribuições para a física foram feitas quando tinha aproximadamente 40 anos, uma idade avançada em relação a outros pesquisadores. No começo de sua carreira estudava principalmente a segunda lei da termodinâmica.

Figura 8 - Max Planck 1933



Fonte - Wikimedia⁷.

Em 1894, inspirado no trabalho de Wilhelm Wien, Planck se aproxima do problema do corpo negro com base em fundamentos da teoria eletromagnética e da termodinâmica. E em 1897, começa a sua descoberta quando busca a relação entre a radiação e a matéria da partícula ao atingir o equilíbrio térmico. Planck utilizou o teorema de Kirchhoff que fala da independência da matéria com a radiação eletromagnética e construiu um modelo de osciladores harmônicos para explicar a matéria. Nos anos seguintes ele se preocupou em encontrar a entalpia termodinâmica já que todos acreditavam que a lei de Wien estava correta.

Como foi descrito, somente em 1900 que comprovaram experimentalmente que a lei de Wien não respondia corretamente em baixas frequências e altas temperaturas. A lei dizia que o espectro deveria ser proporcional a temperatura, entretanto, mostrou-se independente da temperatura. Então, em 7 de outubro de 1900, Rubens informou os resultados dos experimentos a Planck. E naquele mesmo dia, Planck deduziu a sua fórmula de radiação.

Em 19 de outubro, Kurlbaum, parceiro de Rubens, apresentou na Academia Alemã de Física a falha da fórmula de Wien, e Planck apresentou sua fórmula para distribuição espectral da radiação do corpo negro. Uma equação empírica, que Planck construiu com base na fórmula de Wien e da equação de Rayleigh-Jeans:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi A}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{B\nu/T} - 1}$$

Dois meses depois, 14 de dezembro de 1900, Planck apresentou a hipótese de quantização de energia, baseado na mecânica estatística de Boltzmann. Ele propôs que as energias sucessivas (ΔE) e a frequência (ν) fossem proporcionais, com o objetivo de satisfazer a lei de Wien. Planck notou que a energia total média (\bar{E}) podia ser descrita como $\bar{E} \approx kT$, quando as

diferenças sucessivas de energia ($\Delta\mathcal{E}$) fosse pequena, e $\bar{\mathcal{E}} \approx 0$ quando fosse grande. A forma dessa função é:

$$\Delta\mathcal{E} = h\nu$$

Sendo " h " a constante de proporcionalidade, chamada constante de Planck. O trabalho de Planck apresentado em 1900, mesmo iniciando uma revolução na física, só começou a ter reconhecimento em 1905 com o trabalho de Einstein e a sua hipótese dos fótons.

Um fato interessante é que foi Max Planck quem recebeu o primeiro artigo de Einstein falando sobre a relatividade, em 1905, ideia que ele defendeu na área acadêmica. Contudo demorou para aceitar a teoria quântica da radiação de Einstein, que concretizou posteriormente o seu próprio trabalho. Essa demora é devida ao seu conservadorismo físico, pois buscava enquadrar o seu conceito de quantum na física clássica.

Agora que vimos como aconteceu o desenvolvimento da teoria quântica antiga, percebemos como é construído um conceito físico, ou até mesmo uma teoria. A física é realizada por pessoas comuns, que a partir de inquietações físicas desenvolvem trabalhos que impactam a sociedade e a comunidade científica.

Referências Bibliográficas

- [1] Eisberg, R. *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*, R. Eisberg, R. Resnick. Rio de Janeiro: Editora Campus (1994), 9ª Ed.
- [2] Polito, A.M.M.(2017) *Radiação de Corpo Negro e os Primórdios da Física Quântica*. Brasília: Physicae Organum, vol.3, n.2.
- [3] Studart, N. (2000). *A invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck*. São Paulo: Revista Brasileira do Ensino de Física, vol.22, n.4.
- [4] Medeiros, W.H. (2010). *Primórdios da Física Quântica: Radiação de Corpo Negro e Efeito Fotoelétrico*. Rondônia.
- [5] Raios Catódicos. Portal São Francisco. Disponível em: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/fisica/raios-catodicos>>.
- [6] Raios Catódicos. Mundo Vestibular. Disponível em: <<http://www.mundovestibular.com.br/articles/1203/1/raios-catodicos/Paacutegina1.html>>.

[7] Julius Plücker. UFCG. Disponível em:

<<http://www.dec.ufcg.edu.br/biografias/JuliusPl.html>>.

[8] Noções Sobre Condução de Eletricidade pelos Gases. USP. Disponível em:

<http://efisica.if.usp.br/moderna/conducao-gas/cap1_08/>.

[9] Biografia de Joseph John Thomson. Disponível em:

<https://www.ebiografia.com/joseph_john_thomson/>.

[10] Ondas Eletromagnéticas. Mundo Educação. Disponível em:

<<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/o-que-sao-ondas-eletromagneticas.htm>>.

[11] A História do Eletromagnetismo. Brasil Escola. Disponível em:

<<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-historia-eletromagnetismo.htm>>.

[12] Leis de Radiação (Para Corpos Negros). UFPR. Disponível em:

<<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>>.

[13] Radiação térmica - Teoria de Planck. UFRGS. Disponível em:

<https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/radTerm/aRadTermFrame.htm>.

Referência das Figuras

¹ A descoberta do raio X. A imagem comunica. Disponível em:

<<http://aimagemcomunica.blogspot.com.br/2011/04/>>.

² Biografia de Joseph John Thomson. Disponível em:

<https://www.ebiografia.com/joseph_john_thomson/>.

³ Photoelectric effect. Wikimedia Commons. Disponível em:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_effect.png>.

⁴ InfoEnem. Disponível em: <<https://www.infoenem.com.br/sabia-que-fisica-moderna-cai-e-muito-no-enem/>>.

⁵ Radiação de corpo negro. Universidade do Porto. Disponível em:

<<https://def.fe.up.pt/fisica3/quantica1/index.html>>.

⁶ Radiação térmica - Teoria de Planck. UFRGS. Disponível em:

<https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/radTerm/aRadTermFrame.htm>.

⁷ Max Planck 1933. Wikimedia Commons. Disponível em:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Max_Planck_1933.jpg>.