

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO

RAUL PINHEIRO DA SILVA

ORIENTADORA: PROF.^a DR^a. FERNANDA KEILA MARINHO DA SILVA

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. TERSIO GUILHERME DE SOUZA CRUZ

Sorocaba - SP
Abril de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA
ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO
MÉDIO**

RAUL PINHEIRO DA SILVA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Fernanda Keila Marinho da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Tersio Guilherme de Souza Cruz.

Sorocaba - SP
Abril de 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Raul Pinheiro da Silva, realizada em 30/04/2025.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Fernanda Keila Marinho da Silva (UFSCar)

Prof. Dr. Marlon Caetano Ramos Pessanha (UFSCar)

Prof. Dr. Romis Ribeiro de Faissol Attux (UNICAMP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.

Silva, Raul Pinheiro da

Proposta de Sequência Didática para Ensino de
Mecânica Quântica no Ensino Médio / Raul Pinheiro da
Silva -- 2025.
251f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São
Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Fernanda Keila Marinho da Silva
Banca Examinadora: Marlon Caetano Ramos Pessanha,
Romis Ribeiro de Faissol Attux
Bibliografia

1. Mecânica Quântica. 2. Pseudociências. 3. Sequência
Didática. I. Silva, Raul Pinheiro da. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

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

RAUL PINHEIRO DA SILVA

**PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA ENSINO DE MECÂNICA
QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.
Área de concentração: Física no Ensino Médio.
Sorocaba, 30 de abril de 2025.

Orientadora:

Prof.^a Dr.^a Fernanda Keila Marinho da Silva
Universidade Federal de São Carlos

Examinador:

Prof. Dr. Márlon Caetano Ramos Pessanha
Universidade Federal de São Carlos

Examinador:

Prof. Dr. Romis Ribeiro de Faissol Attux
Universidade Estadual de Campinas

Sorocaba - SP
Abril de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, por todo o amor e apoio incondicional, à minha companheira Bruna pela parceria ao longo desses anos e aos amigos que fiz ao longo desta caminhada, que tornaram tudo mais leve e significativo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família e amigos, que estiveram ao meu lado com amor, apoio e compreensão em todos os momentos, tornando essa jornada possível. A vocês, que sempre acreditaram e me incentivaram, sou eternamente grato.

Aos meus orientadores, Prof.^a Dr.^a Fernanda Keila Marinho da Silva e Prof. Dr. Tércio Guilherme de Souza Cruz, expresse minha gratidão pelo suporte acadêmico e pelas orientações ao longo de todo o processo, que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Aos colegas de turma agradeço pela parceria e pelas trocas que tornaram o percurso mais leve e colaborativo.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001. Assim, também agradeço à CAPES pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o meu período de formação.

*“Quanta do latim
Plural de quantum
Quando quase não há
Quantidade que se medir
Qualidade que se expressar”*

(“Quanta”, Gilberto Gil)

RESUMO

SILVA, Raul Pinheiro da. Proposta de Sequência Didática para Ensino de Mecânica Quântica no Ensino Médio. 2025. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2025.

O presente trabalho teve como objetivos principais: (1) desenvolver uma sequência didática que aborde tópicos específicos da Física Quântica (FQ), com foco em desconstruir conceitos pseudocientíficos relacionados ao tema; (2) aplicar essa sequência didática em turmas do Ensino Médio; e (3) avaliar se houve progresso na compreensão dos alunos sobre os conceitos quânticos. A justificativa para o estudo baseia-se nas dificuldades destacadas por diversos autores no ensino da FQ no nível médio, como o formalismo matemático complexo, as inovações conceituais, as limitações no tratamento experimental, falta de material didático/divulgação e a falta de tempo adequado para a abordagem desses temas. Além disso, o misticismo quântico e a propagação de pseudociências, que frequentemente distorcem os princípios científicos, reforçam a necessidade de uma intervenção educativa estruturada. A sequência didática foi elaborada com base nos estudos de Antoni Zabala, visando a uma estrutura progressiva e diversificada que facilitasse a compreensão e o engajamento dos alunos. A metodologia combinou abordagens pedagógicas variadas, com atividades experimentais e discussões interativas. Os resultados mostraram que a sequência foi eficaz: a maioria dos alunos relatou maior entendimento dos fenômenos físicos e muitos se sentiram mais preparados para distinguir ciência de pseudociência. A análise dos dados indicou uma melhoria na compreensão dos conceitos, evidenciando a contribuição do trabalho para o ensino de Física Quântica no Ensino Médio e para o fortalecimento de uma educação científica crítica.

Palavras-chave: Mecânica Quântica. Sequência didática. Pseudociência.

ABSTRACT

SILVA, Raul Pinheiro da. Didactic Sequence Proposal for Teaching Quantum Mechanics in High School. 2025. Dissertation (Master's Degree in Physics Teaching) – Federal University of São Carlos, Sorocaba, campus, Sorocaba, 2025.

The main objectives of this study were: (1) to develop a didactic sequence that addresses specific topics in Quantum Physics (QP), focusing on debunking pseudoscientific concepts related to the subject; (2) to apply this didactic sequence in high school classes; and (3) to evaluate whether there was progress in students' understanding of quantum concepts. The justification for the study is based on the difficulties highlighted by several authors in teaching Quantum Physics at the high school level, such as the complexity of mathematical formalism, conceptual innovations, limitations in experimental approaches, the lack of didactic materials and outreach, and the insufficient time available to cover these topics adequately. Furthermore, quantum mysticism and the spread of pseudosciences, which often distort scientific principles, reinforce the need for a structured educational intervention. The didactic sequence was developed based on the studies of Antoni Zabala, aiming at a progressive and diversified structure that would facilitate students' understanding and engagement. The methodology combined a variety of pedagogical approaches, including experimental activities and interactive discussions. The results showed that the sequence was effective: most students reported a better understanding of physical phenomena, and many felt more prepared to distinguish science from pseudoscience. Data analysis indicated an improvement in concept comprehension, highlighting the contribution of this work to the teaching of Quantum Physics in high school and to the reinforcement of critical scientific education.

Keywords: Quantum Mechanics. Didactic sequence. Pseudoscience.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética plana.....	35
Figura 2 - Esquema do espectro eletromagnético.....	35
Figura 3 - Representação esquemática de um corpo negro.....	37
Figura 4 - Intensidade espectral como função do comprimento de onda.....	38
Figura 5 - Gráfico dos pontos experimentais (pontos vermelhos) e da previsão teórica da Física Clássica - Rayleigh e Jeans (linha sólida azul).....	39
Figura 6 - Resultado teórico de Planck (curva contínua) e curva experimental de radiação do corpo negro (pontos).....	41
Figura 7 - Um esquema experimental usado para observar e medir o efeito fotoelétrico.....	42
Figura 8 - Modelo de camadas do átomo de Bohr representando os processos de absorção (esq.) e emissão (dir.).....	44
Figura 9 - (esq.) Elétron absorvendo um quantum de Energia $h.f$ e mudando para um estado mais externo. (dir.) Elétron emite um quantum de energia $h.f$ ao retornar para seu estado...	45
Figura 10 - Espectros de diferentes fontes.....	46
Figura 11 - Um espectroscópio simples. As imagens da fenda iluminada são projetadas em uma tela, criando um padrão de linhas. O espectro resultante é específico para a luz que ilumina a fenda.....	46
Figura 12 - As três melhores medidas do espectro solar, realizadas às 16h do dia 31/10/2018. As linhas em vermelho são os ajustes utilizando o LogNormal no Origin.....	47
Figura 13 - Um arranjo experimental para demonstrar o espectro de absorção de um gás..	48
Figura 14 - Em preto: espectro do Sol (16h), em vermelho: espectro do CO ₂ , em azul: espectro de H ₂ O, com foque na região do visível.....	49
Figura 15 - Esquema simplificado para ilustrar as órbitas eletrônicas de um átomo que possuem raios discretos, porque as suas circunferências são números múltiplos inteiros do comprimento de onda do elétron.....	50
Figura 16 - Esquema original proposto para o experimento de Newton com os prismas.....	53
Figura 17 - Telescópio Refletor apresentado por Newton à Royal Society em 1671. Na figura, as duas coroas são o mesmo objeto visto a 90 metros de distância pelo telescópio refletor de Newton (fig.2) e por um telescópio refrator (fig.3) como 61 cm de comprimento (que aumentava 14 vezes).....	54
Figura 18: (a) A bola vermelha vista sob luz branca. (b) A bola vermelha vista sob luz vermelha. (c) A bola vermelha vista sob luz verde.....	55
Figura 19 - Esquemático do olho humano.....	57
Figura 20: A mistura de luzes coloridas. Quando três projetores emitem luzes vermelha, verde e azul sobre uma tela branca, as áreas de superposição produzem diferentes cores. O branco é gerado onde as três luzes se sobrepõem.....	58
Figura 21: Experimento realizado utilizando 3 lâmpadas RGB.....	58
Figura 22 - Espectro coletado das principais cores de um monitor RGB e do Branco.....	59
Figura 23: Esquema do processo de excitação e relaxação do elétron.....	60

Figura 24 - Esquemático representando o processo da Fluorescência.....	61
Figura 25 - Visualização de tumor marcado com uma variante vermelha da GFP: uma aplicação biofotônica de proteínas bioluminescentes como GFP e luciferases.....	62
Figura 26 - Capa do Produto Educacional.....	71
Figura 27 - Quadro “Tarde de Domingo na Ilha de Grande Jatte” (1884 – 1886) apresentado aos estudantes como exemplo de pontilhismo.....	80
Figura 28 - Imagem utilizada durante a atividade sobre pontilhismo.....	82
Figura 29 - Demonstração utilizando laser verde e borrifador de água.....	83
Figura 30 - Refletor RGB e controle remoto utilizados na atividade experimental.....	84
Figura 31 - Fonte de luz UV utilizada na atividade experimental.....	84
Figura 32 - Exemplos de desenhos.....	85
Figura 33 - Tintas Neon para maquiagem e foto do efeito observado na luz neon.....	85
Figura 34 - Fotos da aplicação da atividade com tintas neon.....	86
Figura 35 - Imagens apresentadas aos estudantes: ferro incandescente e vagalume.....	87
Figura 36 - Simulador sobre espectro de Corpo Negro utilizando durante a aula.....	87
Figura 37 - Resumo das estratégias para tentar identificar um texto pseudocientífico.....	89
Figura 38 - Exemplos de sites encontrados ao pesquisarmos “salto quântico” na ferramenta de busca Google.....	90
Figura 39 - Molde para construção do espectrógrafo.....	91
Figura 40 - (esq.) Espectrógrafo construído conforme o modelo fornecido. (dir.) Espectro da luz branca emitida por uma lâmpada fluorescente.....	91
Figura 41 - Simulador PHET para o efeito fotoelétrico.....	94
Figura 42 - Figuras de difração para (a) feixe incidente de raios-X, enquanto em (b) temos o feixe composto por elétrons. Vale observar que, para o caso da figura, o comprimento de onda de de Broglie, para os elétrons, é o mesmo que o dos fótons de raios-X.....	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Competências e Habilidades relacionadas com a Sequência Didática.....	64
Quadro 2 - O ensino segundo as características tipológicas dos conteúdos.....	67
Quadro 3 - Categorias e respostas para questão 6.1.1.....	98
Quadro 4 - Categorias e respostas para questão 6.1.2.....	100
Quadro 5 - Categorias e respostas para questão 6.1.3.....	101
Quadro 6 - Categorias e respostas para questão 6.1.4.....	102
Quadro 7 - Categorias e respostas para questão 6.1.5.....	103
Quadro 8 - Categorias e respostas para questão 6.2.1.....	105
Quadro 9 - Categorias e respostas para questão 6.2.2.....	106
Quadro 10 - Categorias e respostas para questão 6.2.3.....	106
Quadro 11 - Categorias e respostas para questão 6.2.4.....	108
Quadro 12 - Categorias e respostas para questão 6.2.5.....	108
Quadro 13 - Categorias e respostas para questão 6.3.1.....	110
Quadro 14 - Categorias e respostas para questão 6.3.2.....	111
Quadro 15 - Categorias e respostas para questão 6.3.3.....	112
Quadro 16 - Categorias e respostas para questão 6.4.1.....	113
Quadro 17 - Categorias e respostas para questão 6.4.3.....	115
Quadro 18 - Categorias e respostas para questão 6.4.5.....	116
Quadro 19 - Categorias e respostas para questão 6.4.6.a.....	118
Quadro 20 - Categorias e respostas para questão 6.4.6.b.....	119
Quadro 21 - Categorias e respostas para questão 6.4.7.....	121
Quadro 22 - Categorias e respostas para questão 6.4.8.a.....	123
Quadro 23 - Categorias e respostas para questão 6.4.8.b.....	124
Quadro 24 - Categorias e respostas para questão 6.4.9.....	126
Quadro 25 - Categorias e respostas para questão 6.4.10.....	128
Quadro 26 - Categorias e respostas para questão 6.4.11.a.....	131
Quadro 27 - Categorias e respostas para questão 6.4.11.b.....	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNCC - Base Nacional Comum Curricular

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

EM - Ensino Médio

FQ - Física Quântica

MQ - Mecânica Quântica

MNPEF - Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

PROFIS-So - Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física/campus Sorocaba

SBF - Sociedade Brasileira de Física

SD - Sequência Didática

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	14
2 - FÍSICA QUÂNTICA E SUA ABORDAGEM NO ENSINO MÉDIO.....	17
2.1 - Revisão da Literatura e Justificativa.....	17
2.2 - Pseudociência e Física Quântica.....	22
2.3 - Referencial Teórico de Ensino.....	24
3 - TÓPICOS DE FÍSICA.....	31
3.1 - Breve contextualização histórica sobre o início da Física Quântica.....	31
3.1.1 - James Clerk Maxwell e a natureza da luz.....	33
3.1.2 - A investigação do problema da radiação térmica.....	36
3.1.3 - Planck e o início da quantização da energia.....	39
3.1.4 - 1905 e o artigo de Einstein sobre o efeito fotoelétrico.....	41
3.1.5 - 1913 e o novo modelo para a Matéria de Bohr.....	44
3.1.6 - Espectrógrafo e estudo dos espectros.....	45
3.1.7 - Ondas de matéria de De Broglie.....	49
3.2 - Breve história sobre a natureza da luz e fenômenos luminosos.....	51
3.2.1 - Contribuições de Isaac Newton para a compreensão da natureza da luz.....	52
3.2.2 - Teoria das Cores e Reflexão da luz.....	54
3.2.3 - Misturando cores: RGB e óptica da visão.....	55
3.2.4 - Fluorescência, Fosforescência e Bioluminescência.....	59
4 – DESENVOLVIMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	63
4.1 - Sequências Didáticas.....	66
4.2 - Produto desenvolvido: sequência didática “física quântica no ensino médio: o universo além do visível”.....	71
5 – DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO DO PRODUTO.....	79
6 - ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÕES.....	97
6.1 - Resultados do questionário inicial.....	99
6.2 - Resultados do questionário pós atividade luz e cores.....	106
6.3 - Resultados do questionário pós espectrógrafo.....	110
6.4 - Resultados do questionário final.....	114
6.5 - Análise geral dos dados.....	133
7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	136
REFERÊNCIAS.....	138
APÊNDICE.....	141

1 - INTRODUÇÃO

Valendo-se do grande sucesso da Mecânica Quântica como ciência, na primeira década dos anos 2000, o “misticismo quântico” disseminou-se fortemente na mídia e em boa parte da sociedade (Pessoa Júnior, 2011). Atualmente diversos profissionais apropriam-se de conceitos ou temas da Física, especialmente da Física Moderna, inserindo-os em outras áreas de atuação profissional sem, no entanto, a existência de fundamento científico. Tais apropriações são conhecidas como “pseudociências” e, de modo geral, constituem-se como explicações ou interpretações de fenômenos a partir de terminologias da ciência, porém sem considerar o rigor e o cuidado necessários e existentes na própria ciência. As notícias falsas e os “charlatões quânticos” são veiculados pelas diferentes mídias e alcançam diversos grupos sociais, inclusive estudantes do Ensino Médio.

Diante da disseminação de interpretações pseudocientíficas sobre a Física Quântica, a inserção desse conteúdo no Ensino Médio torna-se essencial. No entanto, como destacaram Silva e Almeida (2011), o número de propostas de ensino de Física Quântica nessa etapa ainda é limitado, com apenas 16 iniciativas identificadas em um levantamento realizado pelos autores. Essa carência reforça a relevância de propostas como a sequência didática apresentada neste trabalho, que visa contribuir para diminuir essa lacuna, oferecendo uma abordagem científica estruturada para os estudantes do Ensino Médio. Entende-se que, apesar de transcorridos mais de 10 anos da pesquisa de Silva e Almeida (2011), a realidade brasileira não se alterou significativamente.

Somando as considerações anteriores ao contexto crítico vivenciado no Brasil nos últimos seis anos, marcado pelo declínio da confiança na ciência e pelo aumento da desinformação, especialmente entre 2018 e 2024, observa-se um crescimento significativo de teorias pseudocientíficas e de movimentos contrários ao conhecimento científico. Esse cenário teve impacto direto na percepção pública da ciência e na educação, ilustrado pela perda de credibilidade científica em diversas áreas. Diante desse contexto, a presente dissertação tem por objetivos: (1) produzir uma sequência didática que problematize tópicos específicos da Mecânica Quântica relacionados à pseudociência; 2) aplicar a sequência didática junto ao público do

Ensino Médio; 3) verificar se, de fato, a aplicação da sequência didática surtiu efeito na compreensão geral de temáticas relacionadas à Mecânica Quântica.

A sequência didática desenvolvida nesta dissertação fundamenta-se na perspectiva construtivista de Zabala (1998), que compreende o ensino como um processo dinâmico e reflexivo, no qual o professor atua como mediador da aprendizagem, ajustando sua prática conforme as necessidades dos alunos. Para o autor, o conhecimento pode ser construído progressivamente por meio de sequências didáticas organizadas de forma coerente, integrando conteúdos conceituais, procedimentais e atitudinais. Essa abordagem enfatiza metodologias ativas que estimulam a participação dos estudantes, permitindo que desenvolvam habilidades analíticas e críticas. Além disso, a aprendizagem significativa ocorre quando os alunos se envolvem ativamente na resolução de problemas e na construção do conhecimento, rompendo com a visão tradicional de ensino centrada apenas na transmissão de informações.

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, cada um com um foco específico que conduz o leitor pelo desenvolvimento desta pesquisa.

O Capítulo 2 trata da Física Quântica e sua abordagem no Ensino Médio. Nele, discutimos a importância de introduzir a Física Quântica no currículo escolar, abordando os benefícios e os desafios dessa inclusão. Além disso, o capítulo estabelece o foco do trabalho, explorando as razões pelas quais a Física Moderna, especialmente a Quântica, deve ser acessível aos alunos dessa faixa etária.

O Capítulo 3, intitulado Tópicos de Física, traz a base teórica necessária para embasar o desenvolvimento da sequência didática proposta. Este capítulo oferece uma revisão histórica e conceitual dos principais tópicos da Física Quântica, começando com uma contextualização histórica do surgimento da Física Quântica. Explora-se o trabalho de James Clerk Maxwell e suas contribuições sobre a natureza da luz, a virada do século XIX para o século XX e as investigações sobre a radiação térmica que culminaram nas descobertas de Planck e Einstein. Também são abordadas as contribuições de Bohr e de Broglie, finalizando com uma visão geral sobre a natureza da luz e fenômenos luminosos.

No Capítulo 4, intitulado Desenvolvimento da Sequência Didática, discutimos as decisões pedagógicas que orientaram a criação do produto educacional proposto. Nesse ponto, exploramos o motivo da escolha de uma sequência didática como produto principal, destacando as vantagens de usar metodologias ativas e de

organizar o conteúdo de forma flexível e envolvente. O capítulo se aprofunda no desenvolvimento da sequência didática "Física Quântica no Ensino Médio: O Universo Além do Visível", explicando as principais escolhas metodológicas e pedagógicas que guiaram sua criação.

O Capítulo 5 é dedicado à Descrição da Aplicação do Produto, em que detalhamos a implementação prática da sequência didática em sala de aula. Aqui, exploramos as atividades realizadas e as adaptações necessárias ao longo do processo de ensino, oferecendo uma visão prática de como o produto foi utilizado pelos alunos e professores.

Finalmente, no Capítulo 6, apresentamos os Resultados e Discussões, em que analisamos os dados coletados durante a aplicação da sequência didática. Esse capítulo reflete sobre o impacto das metodologias utilizadas, discutindo os resultados obtidos no aprendizado dos estudantes e propondo melhorias e considerações para futuras aplicações.

2 - FÍSICA QUÂNTICA E SUA ABORDAGEM NO ENSINO MÉDIO

2.1 - REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

Pinto e Zanetic (1999) apontam que, no final dos anos 1990, a Física Moderna e a Física Quântica não eram abordadas nos currículos do Ensino Médio no Brasil, enfatizando a necessidade de atualização tanto dos tópicos de Física quanto das metodologias utilizadas no ensino desses conteúdos. No contexto científico, a Física Moderna surge para explicar fenômenos que a Física Clássica não dava conta de resolver e acaba por mudar a percepção humana sobre a realidade, constituindo uma nova visão de mundo. Os autores defendem que ensinar Física Moderna no Ensino Médio permite que os estudantes acessem novas concepções sobre o mundo natural e se aproximem dos contextos científicos contemporâneos. Além disso, o ensino da Física Quântica pode resgatar o interesse dos estudantes pela Física, ao associá-la às descobertas científicas mais recentes (Pinto e Zanetic, 1999).

Silva e Almeida (2011) complementam essa discussão ao apontarem que, apesar da relevância dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea, especialmente da Física Quântica, sua inserção nos currículos escolares enfrentava muitos desafios. Entre os principais obstáculos estão a falta de formação adequada dos professores e a escassez de materiais didáticos específicos para abordar esses temas no Ensino Médio. Esses pontos destacam a relevância das observações de Pinto e Zanetic (1999), pois os desafios ainda persistem após décadas.

Em estudo mais recente, Goulart e Leonel (2022) apontam que as principais dificuldades para inserir a Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio estão relacionadas, sobretudo, à formação inicial inadequada dos docentes, que frequentemente não recebem preparação suficiente para lidar com esses conteúdos mais complexos, reforçando dificuldades apresentadas por Silva e Almeida (2011). Além disso, a carência de materiais didáticos adequados e específicos também é

apontada como uma barreira significativa, dificultando a abordagem clara e contextualizada dos conceitos da FMC em sala de aula.

Outro aspecto identificado pelos autores refere-se à resistência curricular, já que muitos professores consideram que os conteúdos tradicionais da Física Clássica têm maior relevância para avaliações externas e vestibulares, resultando em menor valorização da Física Moderna e Contemporânea nos planejamentos escolares (Goulart e Leonel, 2022). Essa situação reforça a necessidade urgente de propostas didáticas bem estruturadas e fundamentadas teoricamente, como as discutidas neste trabalho, capazes de contribuir para a superação dessas dificuldades e ampliar o espaço da FMC no Ensino Médio.

Busatto et al. (2018), ao investigarem o ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) em escolas de Ensino Médio da região norte do estado do Rio Grande do Sul, destacam que, embora 100% dos entrevistados tenham considerado importante a presença desses conteúdos no Ensino Médio, ainda existem dificuldades significativas para sua implementação em sala de aula. De acordo com os resultados apresentados pelos autores, aproximadamente 45% dos docentes entrevistados apontam os conteúdos de FMC como complexos e difíceis de serem compreendidos pelos estudantes, o que justifica a necessidade de abordagens metodológicas que favoreçam a compreensão significativa desses conceitos.

Sobre a produção de dissertações de mestrado relacionadas ao tema de FMC, o estudo de Pereira e Erthal (2022) analisou 1.208 dissertações da produção do MNPEF. No que se refere aos conteúdos abordados, a Física Moderna esteve presente em 13,95% das dissertações analisadas, percentual próximo ao de temas clássicos, como Cinemática (10,10%) e Dinâmica (12,64%). Esses dados sugerem que, embora a Física Moderna já tenha um espaço relevante nas pesquisas do MNPEF, sua representatividade ainda é comparável à de conteúdos tradicionais.

Barros e Barbosa (2024), ao analisarem as dissertações produzidas pelo MNPEF na região Nordeste, destacam que os conteúdos relacionados à Física Moderna ainda apresentam pouca representatividade nos trabalhos acadêmicos desenvolvidos. De acordo com os autores, dos 210 trabalhos analisados em cinco polos dessa região, apenas 22 (aproximadamente 10%) contemplaram temas vinculados à Física Moderna. Ainda conforme Barros e Barbosa (2024), entre os poucos trabalhos sobre Física Moderna identificados, a abordagem específica sobre

Física Quântica é ainda mais rara. Predominam temas relacionados ao efeito fotoelétrico, à radiação e à relatividade.

Além disso, Busatto et al. (2018) destacam que conteúdos específicos da Física Quântica aparecem com menor frequência nas abordagens relatadas pelos docentes pesquisados, predominando apenas tópicos como o efeito fotoelétrico e a dualidade onda-partícula. Tal constatação reforça a relevância do presente trabalho de mestrado, que tem como proposta justamente contribuir para o preenchimento dessa lacuna identificada pelos autores, oferecendo uma sequência didática específica e estruturada sobre Física Quântica para o Ensino Médio.

Silva Filho et al. (2021) analisaram as dissertações e produtos educacionais produzidos pelo MNPEF, especificamente no polo da Universidade de Brasília (UnB), entre os anos de 2013 e 2021. Os autores destacam que entre as temáticas mais recorrentes nesses trabalhos não aparece Física Quântica. Quanto às abordagens metodológicas, o estudo identificou que a utilização de sequências didáticas aparece como uma das estratégias mais adotadas pelos mestrandos do programa, reforçando sua relevância como estratégia capaz de facilitar a inserção dos conteúdos mencionados no ambiente escolar. Por fim, destacam ainda que os referenciais teóricos predominantes nos trabalhos analisados foram a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e a perspectiva sociointeracionista de Vygotsky.

Hoernig et al. (2021) destacam a Física Quântica como um conteúdo escolar de grande relevância, pois possui legitimidade cultural e social, além de contribuir para a formação cidadã devido à sua ampla aplicação em diversas tecnologias e artefatos criados pelo ser humano. Os autores argumentam que sua legitimidade cultural se deve à sua grande influência em aspectos da cultura contemporânea, como na ficção científica e em diversas obras que utilizam a quântica para divulgação científica. A relevância social é evidenciada pela iminente segunda revolução quântica, impulsionada por novas aplicações da Física Quântica, como computadores quânticos, criptografia quântica, entre outros.

Algumas dificuldades adicionais no ensino da Física Quântica no Ensino Médio são apresentadas por Pinto e Zanetic (1999), como o formalismo matemático inerente à descrição quântica, as novidades conceituais – bastante diferentes da Física Clássica – e as dificuldades em trabalhar experimentalmente com esses temas. Além dessas barreiras, Hoernig et al. (2021) apontam a falta de tempo como

uma limitação recorrente entre os professores que tentam inserir a Física Quântica no Ensino Médio, visto que esse conteúdo costuma ser deixado para o final do ciclo, no 3º ano.

Atualmente, com a reforma do Ensino Médio¹ e a implementação do Currículo Paulista, a situação agrava-se ainda mais, pois a carga horária destinada às disciplinas da área de Ciências da Natureza foi reduzida significativamente. Essa diminuição de tempo impacta diretamente a profundidade com que os conteúdos são abordados, especialmente nas disciplinas de Física e Química (Cavalcanti e Carvalho, 2021). Esse cenário torna o desafio de incluir Física Quântica no currículo regular ainda mais complexo e reforça a necessidade de rever o espaço destinado a esses conteúdos no novo modelo de ensino.

Outra questão relevante é a inserção da História e Filosofia da Ciência no ensino de Física Quântica. Essas áreas podem facilitar a construção conceitual e cultural no Ensino Médio, permitindo uma compreensão mais profunda da natureza da ciência. Contudo, apesar de sua importância, poucos trabalhos dedicam-se a introduzir a Física Quântica com uma abordagem baseada na História e Epistemologia da Ciência no Ensino Médio (Hoernig et al, 2021).

O artigo de Souza, Reis e Hora (2024) apresenta um levantamento sobre o estado da arte da divulgação científica (DC) da Física Quântica (FQ) entre 2010 e 2022. Os autores identificaram um déficit significativo na produção acadêmica voltada para a DC da FQ, com apenas 11 estudos encontrados entre 137 produções acadêmicas consultadas. Entre os trabalhos analisados, foram identificados sete artigos que propõem materiais de consulta para professores do Ensino Médio, incluindo experimentos e ilustrações para facilitar a compreensão de conceitos quânticos. No entanto, muitos desses materiais ainda dependem de formalismo matemático, tornando-os mais adequados para professores do que para os alunos diretamente. Os artigos voltados para o Ensino Médio não foram classificados como divulgação científica pelos autores do estudo.

¹Cabe destacar duas considerações relevantes sobre o contexto curricular atual (2025). A primeira refere-se ao potencial dos itinerários formativos para incluir conteúdos de Física Moderna e Contemporânea (FMC), a depender da natureza temática e da intencionalidade pedagógica dos componentes curriculares. A segunda consideração diz respeito à recente reestruturação curricular promovida pela Reforma do Novo Ensino Médio no estado de São Paulo, que restaurou a carga horária da disciplina de Física em todos os anos do Ensino Médio, retomando as aulas duplas semanais.

No trabalho de Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009), os autores analisaram o discurso de cinco professores de Física para investigar os desafios que os professores enfrentam ao tentar ensinar Física Moderna e Contemporânea (FMC), especificamente a Física Quântica, nas escolas de Ensino Médio no Brasil. Os autores identificam que uma das principais dificuldades reside na formação dos professores. A pesquisa aponta que os docentes se sentem inseguros em abordar essas temáticas devido à própria falta de compreensão, o que os leva a transmitir conteúdos de maneira superficial ou a evitá-los completamente. Outro ponto levantado é o descompasso entre o avanço científico e a maneira como esses conteúdos são apresentados no ambiente escolar, frequentemente de maneira desconexa e desatualizada.

Além dessas dificuldades, é importante considerar também a ausência de um repertório prático por parte dos professores para o ensino da Física Quântica. Em muitos casos, os próprios docentes não tiveram, enquanto estudantes, contato efetivo com os conteúdos da Física Moderna e Contemporânea, o que compromete sua segurança e familiaridade ao abordar esses temas em sala de aula.

Os autores também destacam que o excesso de conteúdo no currículo, a falta de tempo para abordar tópicos complexos e a ausência de recursos didáticos apropriados contribuem para essa lacuna no ensino. Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009) sugerem que a superação desses desafios passa por uma melhor formação docente, pelo desenvolvimento de recursos pedagógicos adequados e pela incorporação de exemplos práticos e cotidianos que aproximem os alunos da realidade da Física Moderna, tornando o ensino de Física Quântica mais acessível e relevante.

Diante dos desafios identificados na literatura, tanto relacionados à formação docente quanto à inserção da Física Quântica no currículo escolar, fica claro que há uma lacuna significativa que precisa ser preenchida. A relevância cultural, social e tecnológica desse conteúdo justifica sua inclusão no Ensino Médio de maneira mais consistente e acessível. As soluções apontadas por diferentes autores, como a utilização de abordagens qualitativas e históricas, bem como a necessidade de formação continuada para os professores, indicam o caminho a ser seguido. Nesse sentido, a presente pesquisa busca contribuir para o debate, propondo uma sequência didática que possa auxiliar na superação desses obstáculos e aproximar os alunos da Física Moderna e Contemporânea.

2.2 - PSEUDOCIÊNCIA E FÍSICA QUÂNTICA

A pseudociência, conforme definida por Bunge (2002, p. 315), refere-se a uma "doutrina ou prática desprovida de fundamento científico, mas apresentada como ciência". Esse fenômeno representa um desafio significativo no ensino de conceitos científicos, especialmente no campo da Física Quântica. Amaral e Marin (2022) analisam como o discurso pseudocientífico se disfarça de linguagem técnica, apropriando-se de termos e jargões científicos para angariar legitimidade junto ao público leigo. Essas práticas, muitas vezes promovidas sob a forma de terapias ou treinamentos, utilizam a credibilidade da ciência sem fornecer qualquer base empírica ou validade científica.

Os autores destacam que a pseudociência, em suas diversas manifestações, busca emular a aparência do conhecimento científico, com o objetivo de se legitimar. Para tanto, apropria-se de analogias e metáforas da divulgação científica, distorcendo termos e conceitos científicos para construir interpretações equivocadas. No contexto da Física Quântica, essa distorção se torna especialmente evidente, uma vez que os fenômenos descritos pela teoria estão frequentemente distantes da experiência cotidiana, o que oferece uma abertura interpretativa que facilita essas apropriações indevidas. Como explicam Amaral e Marin (2022), a pseudociência explora essa complexidade para mobilizar discursos que vinculam conceitos quânticos a temas como paranormalidade, espiritualidade e misticismo, resultando em um verdadeiro "engambelamento" da ciência, com uma aparência técnica desprovida de rigor empírico e rigor teórico.

Além disso, os autores apontam que as dificuldades inerentes à divulgação científica, especialmente no campo da Física Quântica, contribuem para essa abertura interpretativa. O público leigo, muitas vezes, carece de ferramentas conceituais adequadas para distinguir entre ciência e pseudociência, o que gera um cenário em que termos da Física Quântica são frequentemente retirados de seu contexto original para justificar crenças e práticas pseudocientíficas. Esse uso indevido pode comprometer significativamente a compreensão dos conceitos quânticos no ensino formal, reforçando a necessidade de um esforço educacional mais robusto para combater a desinformação.

Saito (2021) apresenta uma investigação sobre o misticismo quântico, ressaltando a popularização massiva do termo "quântico" em diversos contextos que extrapolam a Física, incluindo medicina alternativa, terapias holísticas e espiritualidade. A autora contextualiza a origem desse fenômeno em três momentos históricos da Física Quântica: o primeiro (1900-1916), marcado pelo surgimento da Física Quântica como domínio específico; o segundo (1917-1926), caracterizado pelo desenvolvimento formal da Mecânica Quântica e pela coexistência de abordagens mais operacionais (Heisenberg e Bohr) e abordagens mais realistas (Schrödinger); e o terceiro período (1927 em diante), que envolve as discussões filosóficas sobre a interpretação da teoria, destacando o papel do observador e da consciência, questões posteriormente apropriadas pelo discurso místico quântico (Saito, 2021).

Além da influência histórica dos debates internos à comunidade da Física Quântica sobre seus problemas de fundamento, também houve a influência do contexto histórico-social mais amplo na gênese e no desenvolvimento do fenômeno cultural do misticismo quântico (Saito, 2021).

Em relação às origens históricas do fenômeno do misticismo quântico, Saito (2021) destaca que alguns fatores socioculturais tiveram forte influência, tais como a contracultura hippie nos Estados Unidos e movimentos posteriores ligados ao Neoesoterismo e à Nova Era. Autores como Fritjof Capra, Amit Goswami e Deepak Chopra são apontados por Saito (2021) como precursores fundamentais desse movimento, responsáveis pela popularização desse discurso por meio de livros amplamente vendidos e traduzidos em vários idiomas.

Por fim, Saito (2021) levanta questões importantes sobre as implicações do misticismo quântico para a Educação Científica, principalmente quanto aos desafios na delimitação clara entre conhecimento científico e não científico, uma vez que interpretações equivocadas da Física Quântica passaram a circular amplamente, gerando distorções e desinformação. Nesse sentido, a autora reforça a necessidade de estratégias educativas que permitam aos estudantes diferenciarem criticamente o conhecimento científico das interpretações pseudocientíficas, destacando o papel crucial da escola e dos professores nesse processo educativo.

No processo de letramento científico, é essencial que os estudantes aprendam a distinguir entre argumentação científica fundamentada e alegações pseudocientíficas. Segundo Gomes e Zamora (2024), essa habilidade é crucial para

identificar controvérsias científicas legítimas e combater as pseudociências, incluindo as quânticas.

A associação entre a Física Quântica e certas interpretações pseudocientíficas é uma questão recorrente, ganhando um termo específico - "misticismo quântico". De acordo com Pigozzo, Nascimento e Lima (2022), o misticismo quântico é descrito como um fenômeno cultural que mescla elementos da Física Quântica com filosofias orientais, espiritualidade, teses sobre consciência, mente e elementos religiosos. Essas abordagens, frequentemente encontradas na mídia e na literatura de divulgação, acabam promovendo interpretações equivocadas, o que pode dificultar o ensino de conceitos científicos de forma precisa (Pigozzo, Nascimento e Lima, 2023).

É essencial que o professor de Física no Ensino Médio esteja preparado para confrontar essas percepções incorretas e auxiliar os alunos a distinguir entre ciência e pseudociência. Como aponta o estudo de Pigozzo et al. (2023), as definições de misticismo quântico tendem a hibridizar conceitos científicos e espirituais, levando à confusão conceitual.

2.3 - REFERENCIAL TEÓRICO DE ENSINO

A construção de uma proposta de ensino exige a adoção de um referencial teórico que sustente suas diretrizes metodológicas e epistemológicas. Nesse contexto, a obra "A Prática Educativa: Como Ensinar", de Antoni Zabala (1998), apresenta-se como um alicerce essencial para o desenvolvimento de uma sequência didática que promova uma aprendizagem significativa. O livro consolidou-se como uma referência teórica no campo da Didática e da formação docente no final da década de 1990. Segundo Neves (2023), a obra de Antoni Zabala ganhou notoriedade ao ser amplamente utilizada nos processos formativos de professores, especialmente após a implementação dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN).

Apesar de sua relevante influência na formulação dos PCNs e no contexto educacional brasileiro, Zabala tem sido pouco utilizado como referencial teórico em publicações voltadas para o ensino de Física nos últimos anos. O estudo de Pereira e Erthal (2022) evidencia essa limitação, mostrando que, embora suas contribuições

para a didática e a organização do ensino sejam amplamente reconhecidas, sua presença em dissertações do MNPEF é restrita, aparecendo explicitamente em um número reduzido de trabalhos. Esse estudo identificou a presença de Antoni Zabala como referencial teórico, especialmente no que se refere às sequências didáticas, sendo citado explicitamente em apenas dez dissertações, concentradas nas regiões Nordeste e Sul.

Pereira e Erthal (2022) analisaram os trabalhos do MNPEF no período de 2013 a 2020, com o objetivo de identificar os temas mais abordados e os referenciais teóricos predominantes nas dissertações defendidas. A pesquisa envolveu a análise de 1.208 dissertações, coletadas em 58 polos do programa, distribuídos por todas as regiões do Brasil. Em relação aos referenciais teóricos mais utilizados, destacam-se a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, presente em 590 trabalhos analisados, seguida pela perspectiva de Lev Vygotsky, utilizada em 239 dissertações, e pela Teoria da Aprendizagem Significativa Crítica, proposta por Marco Antônio Moreira, com 90 trabalhos analisados.

Dessa forma, o presente trabalho ancora-se na perspectiva construtivista defendida por Zabala, que reconhece o papel ativo do estudante no processo de aprendizagem, valorizando a interação entre diferentes agentes educativos, a contextualização dos conteúdos e a reflexão crítica sobre o conhecimento. Além disso, Zabala (1998) destaca a importância da organização didática, enfatizando que a escolha e a forma de apresentação dos conteúdos interferem diretamente na aprendizagem.

O educador catalão parte do entendimento de que “Educar quer dizer formar cidadãos e cidadãs, que não estão parcelados em compartimentos estanques, em capacidades isoladas” (Zabala, 1998, p. 28), contemplando em suas obras temáticas fundamentais da Didática na perspectiva construtivista, tais como a função social da escola, as relações entre docentes e discentes, as sequências didáticas, os materiais didáticos e os processos avaliativos, entre outros. Segundo Zabala (1998, p. 17):

O planejamento e a avaliação dos processos educacionais são uma parte inseparável da atuação docente, já que o que acontece nas aulas, a própria intervenção pedagógica, nunca pode ser entendida sem uma análise que leve em conta as intenções, as previsões, as expectativas e a avaliação dos resultados.

Ou seja, para Zabala, a prática educativa é um processo contínuo, fundamentado no planejamento, na aplicação e na avaliação do ensino. Segundo o autor, esses elementos são indissociáveis, uma vez que a intervenção pedagógica deve ser constantemente analisada e ajustada conforme as necessidades dos estudantes e os objetivos de aprendizagem.

Segundo o autor, podemos definir as atividades ou tarefas como a unidade básica do processo de ensino-aprendizagem, mas é a ordem e as relações que se estabelecem entre diferentes atividades que determinam, de maneira significativa, o tipo e as características do ensino. A configuração das sequências de atividades constitui um dos elementos fundamentais que caracterizam a prática educativa. Dessa forma, a organização e a articulação dessas atividades são determinantes para a efetividade do processo de ensino e aprendizagem, evidenciando a importância do planejamento pedagógico alinhado aos objetivos educacionais.

As unidades didáticas permitem tornar a complexidade unitária, possibilitando incluir as três fases de toda intervenção reflexiva: planejamento, aplicação e avaliação. Zabala (1998) discute os diferentes aspectos que influenciam a prática educativa dentro da sala de aula. O autor destaca que a prática docente não pode ser analisada isoladamente, pois envolve múltiplos fatores interdependentes. Entre as variáveis metodológicas citadas, estão:

- Relações interativas: o papel dos professores e alunos na comunicação e construção do conhecimento;
- Organização social da aula: diferentes formas de agrupamento dos alunos impactam a dinâmica de ensino;
- Distribuição do espaço e tempo: a flexibilidade na organização do ambiente de aprendizagem;
- Materiais curriculares: a escolha e o uso de recursos didáticos;
- Critérios de avaliação: a forma como o desempenho dos alunos é medido influencia os processos de ensino e aprendizagem.

Todas essas variáveis devem ser consideradas de maneira integrada, pois afetam a eficácia da intervenção pedagógica. Quando propomos uma sequência didática (cujo conceito e importância serão mais aprofundados nos capítulos

seguintes), fazemos isso como um modelo teórico que deve ser ajustado de acordo com os condicionantes do contexto educativo (Zabala, 1998).

Em relação ao papel da escola, Zabala (1998) defende que essa instituição deve preparar os estudantes para atuarem criticamente na sociedade, indo além da formação técnica ou meramente acadêmica. No capítulo 2 de sua obra, o autor argumenta que a função social do ensino deve priorizar a formação de cidadãos capazes de compreender, refletir e intervir em seu contexto social. Nesse sentido, esta pesquisa, alinhada a essa concepção, propõe o desenvolvimento de uma sequência didática que não apenas aborde conteúdos específicos, mas também ofereça aos estudantes ferramentas críticas para interpretar e questionar a realidade que os cerca. Especificamente, busca-se enfrentar um desafio atual da educação científica: o combate às pseudociências associadas à Física Quântica.

Para romper com essa tradição, Zabala destaca que a definição dos objetivos da educação deve estar alinhada a uma visão mais inclusiva e formativa. Ele sugere que o ensino deve abranger não apenas conteúdos conceituais, mas também aspectos factuais, procedimentais e atitudinais. Os conteúdos devem ajudar a responder: "o que se deve saber?", "o que se deve saber fazer?" e "como se deve ser?". Além disso, não devem ser vistos apenas como conhecimentos específicos das disciplinas clássicas, mas devem incluir também aqueles que possibilitam o desenvolvimento das capacidades motoras, afetivas, de relação interpessoal e de inserção social. Dessa forma, a aprendizagem deve ser compreendida de maneira ampla, incorporando não apenas o domínio técnico dos conceitos, mas também competências essenciais para a atuação crítica e cidadã dos estudantes (Zabala, 1998).

Zabala (1998) ainda entende que os conteúdos de ensino não são finalidades em si mesmos, mas instrumentos que possibilitam a construção de aprendizagens significativas e a formação integral dos estudantes. Para que isso ocorra, o domínio desses conteúdos deve estar contextualizado, conectado à realidade dos alunos e às demandas sociais contemporâneas, garantindo que o processo educativo contribua efetivamente para o desenvolvimento da autonomia e da capacidade reflexiva dos estudantes.

Conforme mencionado anteriormente, Zabala (1998) discute a concepção construtivista da aprendizagem, enfatizando que o ensino deve promover a construção ativa do conhecimento pelo aluno. O autor destaca que a aprendizagem

ocorre por meio da interação entre os conhecimentos prévios do estudante e as novas informações apresentadas no contexto escolar.

Outro ponto crucial abordado por Zabala refere-se à percepção que o autor tem dos alunos e professores. Ele valoriza profundamente o papel ativo dos estudantes na construção do conhecimento e ressalta a necessidade de uma postura docente reflexiva e crítica. Fundamentado nos princípios da psicologia do desenvolvimento e da aprendizagem, Zabala (1998) explica que a estrutura cognitiva dos alunos é composta por esquemas de conhecimento, os quais são constantemente revisados e modificados conforme novas experiências são incorporadas. Nessa perspectiva, o professor deixa de ser um mero transmissor de conhecimento para assumir o papel de mediador do processo de aprendizagem, criando situações educativas que permitam ao aluno elaborar conceitos e refletir sobre suas aprendizagens.

Para isso, a prática pedagógica deve: (i) relacionar os novos conteúdos com os conhecimentos prévios do aluno; (ii) proporcionar experiências de aprendizagem que incentivem a reflexão e a autonomia; e (iii) favorecer a organização de esquemas mentais mais complexos, permitindo ao estudante generalizar e aplicar os conhecimentos em diferentes contextos.

Segundo o autor, os conteúdos podem ser categorizados em factuais, conceituais, procedimentais e atitudinais, sendo que cada um exige abordagens pedagógicas específicas para uma aprendizagem significativa. No entanto, Zabala (1998) reforça que o ensino não deve ser fragmentado, pois a aprendizagem real ocorre quando esses conteúdos se articulam em um processo contínuo e interdependente. Para garantir a efetividade do ensino, é fundamental que os professores desenvolvam estratégias didáticas que integrem esses diferentes tipos de conteúdos, favorecendo uma educação mais dinâmica e significativa.

Na questão da avaliação, abordada por Zabala no capítulo 8, o autor defende que a avaliação deve ser compreendida como um instrumento formativo, servindo não apenas para verificar o desempenho dos estudantes, mas, sobretudo, para compreender suas dificuldades e potencialidades. Tradicionalmente, essa prática tem sido vista como um instrumento para medir o desempenho dos alunos em relação a objetivos mínimos predefinidos e mensurá-lo com uma nota (escala). No entanto, ele argumenta que a avaliação deve abranger tanto os resultados finais

quanto os processos de ensino-aprendizagem, considerando o progresso individual de cada estudante e a eficácia das estratégias pedagógicas utilizadas.

Ao introduzir a concepção construtivista do ensino e da aprendizagem como referencial psicopedagógico na análise da avaliação, o objeto dessa prática deixa de centrar-se exclusivamente nos resultados obtidos e passa a priorizar o processo de ensino-aprendizagem, tanto do grupo/classe como de cada aluno individualmente.

O autor questiona o enfoque convencional da avaliação, que se concentra exclusivamente no aluno e em seus resultados acadêmicos. Ele sugere que a avaliação deve abranger três níveis: (i) o desempenho do aluno, considerando seus avanços cognitivos, procedimentais e atitudinais; (ii) a prática docente, analisando se as estratégias pedagógicas adotadas favorecem uma aprendizagem significativa; e (iii) o contexto educacional, incluindo o currículo, os materiais didáticos e a organização escolar, elementos que influenciam diretamente o processo de ensino-aprendizagem.

Zabala (1998) distingue três principais funções da avaliação: a avaliação inicial (diagnóstica), realizada no início do processo educativo para identificar os conhecimentos prévios, experiências e dificuldades dos alunos; a avaliação reguladora (formativa), que ocorre ao longo do ensino, permitindo ajustes pedagógicos conforme as necessidades dos estudantes; e a avaliação final (somativa ou integradora), aplicada ao término de um ciclo ou unidade de ensino, com o objetivo de verificar os avanços e consolidar o aprendizado.

O autor também critica o uso exclusivo de provas escritas padronizadas como ferramenta avaliativa e propõe uma abordagem mais diversificada. Para ele, a avaliação deve incluir diferentes métodos, como observação contínua, portfólios, autoavaliação, registros descritivos e avaliação entre pares. Essas estratégias permitem uma compreensão mais abrangente do processo de aprendizagem e auxiliam na identificação dos desafios individuais de cada aluno. Em nosso trabalho, utilizamos a produção de desenhos e imagens, questionários, relatórios, discussões e provas como formas de avaliação ao longo do processo.

Por fim, a avaliação também pode ser entendida como um instrumento de regulação, permitindo ajustes na metodologia, no ritmo das atividades e no suporte oferecido aos estudantes. Essa abordagem visa tornar o ensino mais inclusivo e significativo, garantindo que todos os alunos tenham oportunidades reais de aprendizado, independentemente de suas dificuldades iniciais.

Dessa forma, ao adotar os princípios propostos por Zabala (1998) e a perspectiva construtivista, este estudo fundamenta-se em uma abordagem que valoriza a aprendizagem significativa, o pensamento crítico e a formação integral dos estudantes, alinhando-se às demandas educacionais contemporâneas. A estruturação da sequência didática baseou-se na compreensão de que o ensino deve ser processual, interativo e contextualizado, permitindo que os alunos construam conhecimento de forma ativa e reflexiva, em consonância com os princípios construtivistas, que reconhecem o papel do estudante como protagonista de sua aprendizagem.

Nos capítulos seguintes, serão apresentadas a proposta desenvolvida, sua aplicação em sala de aula e a análise dos resultados obtidos. A partir da articulação entre teoria e prática, busca-se evidenciar como a organização didática baseada nos pressupostos de Zabala e no construtivismo possibilitou o aprofundamento conceitual e a promoção do protagonismo estudantil no ensino de Física Quântica, contribuindo para uma formação científica mais sólida e para o combate às pseudociências.

3 - TÓPICOS DE FÍSICA

3.1 - BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA SOBRE O INÍCIO DA FÍSICA QUÂNTICA

Segundo Pessoa Jr. (2019), se pudéssemos resumir qual é a essência da Física Quântica em relação à Física Clássica, seria o problema da dualidade onda-partícula. Ainda segundo Pessoa Jr. (2019, p. 1), “a Teoria Quântica atribui para qualquer partícula individual aspectos ondulatórios e, para qualquer forma de radiação, aspectos corpusculares”. Partindo dessa visão, optamos por montar a sequência didática com o foco no problema da natureza da luz.

O próprio Planck, em 1919, destacou em uma palestra que a natureza da luz era um dos principais e mais desafiadores problemas da Teoria Quântica (Martins, Rosa, 2014). Para abordar este tema, faremos um breve histórico sobre o início da Física Quântica, iniciando pela contextualização da Física no final do século XIX e início do século XX, começando com as contribuições de Maxwell e culminando com a emergência da Quântica a partir do problema conhecido como "catástrofe do ultravioleta", que deu origem aos desdobramentos iniciais da teoria quântica.

Nos tópicos seguintes, abordaremos dois fenômenos fundamentais que, na virada do século XIX para o século XX, marcaram o início da Física Moderna: a Radiação do Corpo Negro e o Efeito Fotoelétrico. O primeiro, explicado por Max Planck, introduziu o conceito de quantização da energia e é considerado um marco histórico para o surgimento da Física Quântica. Já o segundo, elucidado por Albert Einstein, consolidou a natureza corpuscular da luz. Ambos os fenômenos foram decisivos para o desenvolvimento da Física Quântica, inaugurando uma nova compreensão sobre a interação entre matéria e radiação.

Segundo Martins e Rosa (2014), no final do século XIX, a Física parecia estar completamente resolvida, com muitos cientistas acreditando que os problemas futuros seriam apenas aplicações dos fundamentos já estabelecidos. Durante uma palestra em 1900, Lord Kelvin (1824-1907) sugeriu que a Física estava esgotada, descrevendo-a como "um céu azul, com algumas nuvens no horizonte." Com regras bem definidas para o comportamento da matéria e das ondas, acreditava-se que aos

físicos restava apenas aplicá-las e melhorar a precisão dos experimentos. Essas "nuvens de Kelvin" eram fatos experimentais ainda não explicados, incluindo o experimento de Michelson e Morley e o problema do Corpo Negro. Esses problemas levariam à Teoria da Relatividade e à Teoria Quântica (Martins, Rosa, 2014).

Segundo Griffiths (2011, p. viii): "a teoria quântica não foi criada - nem mesmo determinada definitivamente - por um indivíduo [...]". Para o autor, a quântica "[...] representa uma mudança abrupta e revolucionária das ideias clássicas, suscitando assim uma forma total e radicalmente não intuitiva e nova de se pensar sobre o mundo". Neste trabalho, não será possível mencionar todos os nomes importantes da Física Quântica e o recorte dos nomes foi feito com base na construção da sequência didática.

Saito (2021) descreve três momentos fundamentais no desenvolvimento histórico da Física Quântica. O primeiro momento, compreendido entre 1900 e 1916, corresponde ao surgimento inicial da teoria, tendo como marcos principais os trabalhos pioneiros de Max Planck sobre a quantização da energia e os estudos de Einstein acerca do efeito fotoelétrico. Esses eventos inauguraram uma nova visão sobre a natureza da luz e da energia, desafiando as concepções tradicionais vigentes na Física Clássica.

O segundo período histórico (1916-1927) foi marcado pelo amadurecimento conceitual da Física Quântica, consolidado pelas contribuições de cientistas como Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger e Louis de Broglie. Nessa fase, surgiram modelos mais consolidados, como o modelo atômico de Bohr, a dualidade onda-partícula e as formulações matemáticas da Mecânica Quântica. Nesse contexto, a teoria foi firmando-se como uma base sólida para a explicação de fenômenos até então inexplicáveis pelos modelos clássicos.

O terceiro período, que inicia em 1927, está diretamente associado às interpretações filosóficas e epistemológicas da teoria, especialmente com o debate gerado pelo princípio da incerteza proposto por Heisenberg e as reflexões sobre o papel do observador no processo de medida. Segundo Saito (2021), foi a partir dessas questões interpretativas, frequentemente mal compreendidas, que emergiram as apropriações indevidas da Física Quântica, originando discursos pseudocientíficos e místicos, os quais se intensificaram sobretudo a partir da segunda metade do século XX, alcançando forte repercussão cultural e midiática.

3.1.1 - James Clerk Maxwell e a natureza da luz

Por volta de 1862, James Maxwell calculou que a velocidade de propagação de um campo eletromagnético é aproximadamente igual à da luz e escreveu: "É muito difícil evitar a conclusão de que a luz consiste em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos" (Griffiths, 2011, p. 262). Esse resultado, extremamente importante, reforça a proposta ondulatória para a natureza da luz.

As equações utilizadas nesta seção foram retiradas do livro Eletrodinâmica (Griffiths, 2011, p. 262 e 263) e podem ser conferidas a seguir.

Em regiões do espaço onde não há carga ou corrente, as equações de Maxwell dizem que:

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0, & \text{(iii)} \quad \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\
 \text{(ii)} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, & \text{(iv)} \quad \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Nas equações 3.1, temos que $\mathbf{E}$ é o campo elétrico, $\mathbf{B}$ representa o campo magnético, μ_0 é a permeabilidade do vácuo, também chamada de constante magnética, ϵ_0 é a permissividade do vácuo, também chamada de constante elétrica, também uma constante universal, e t representa o tempo.

Segundo Griffiths (2011), as equações de Maxwell formam um conjunto de equações diferenciais parciais acopladas, de primeira ordem para $\mathbf{E}$ e $\mathbf{B}$. No entanto, elas podem ser *desacopladas* ao aplicar o operador rotacional às equações (iii) e (iv), conforme apresentado a seguir:

$$\begin{aligned}
 \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \\
 &= -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \\
 \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = \nabla \times \left(\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)
 \end{aligned}$$

$$= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{E}) = - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

Sabendo que $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ e $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, chegamos em:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}. \quad (3.2)$$

Agora temos equações *separadas* para $\mathbf{E}$ e $\mathbf{B}$, mas elas são de segunda ordem devido ao desacoplamento. No vácuo, então, cada componente cartesiano de $\mathbf{E}$ e $\mathbf{B}$ satisfaz a **equação de onda tridimensional**.

$$\nabla^2 f = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (3.3)$$

Na equação acima (3.3) temos que f representa a frequência, v é a velocidade e t o tempo, além dos operadores matemáticos.

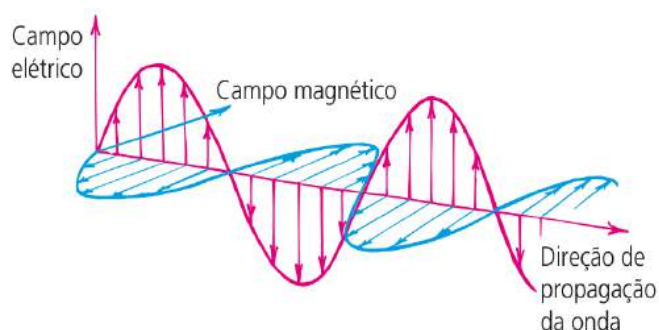
Portanto, as equações de Maxwell sugerem que o espaço vazio comporta a propagação de ondas eletromagnéticas viajando a uma velocidade v .

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s},$$

o que é precisamente a velocidade da luz, c . Ou seja, talvez a luz seja uma onda eletromagnética (Griffiths, 2011).

Enquanto o trabalho de Newton unificou a Mecânica, o trabalho de Maxwell no Eletromagnetismo foi chamado de a segunda grande unificação da Física. Maxwell identificou a relação entre as ondas eletromagnéticas e a luz. Nas ondas planas, os campos elétrico e magnético oscilam perpendicularmente, regenerando-se mutuamente e formando uma onda eletromagnética que se propaga a partir das cargas vibrantes (Hewitt, 2015, p. 480). Um exemplo de esquema simplificado da propagação de uma onda eletromagnética plana pode ser visto na figura 1 a seguir.

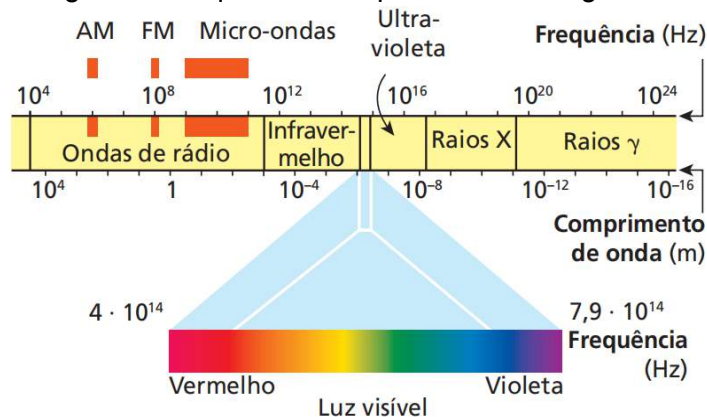
Figura 1 - Os campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética plana.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 488).

Pensando especificamente na luz visível, podemos afirmar que ela é composta por ondas eletromagnéticas que se encontram dentro de uma faixa de frequências perceptíveis pelo olho humano. A luz visível é simplesmente radiação eletromagnética cuja frequência encontra-se em uma faixa específica, entre $4,3 \times 10^{14}$ e $7,9 \times 10^{14}$ vibrações por segundo (Hz) - conforme figura 2 a seguir. No vácuo, as ondas eletromagnéticas propagam-se com a mesma rapidez e diferem entre si nas suas frequências. A classificação das ondas eletromagnéticas, baseada na frequência, constitui o espectro eletromagnético. Vale ainda que a frequência de uma onda eletromagnética no espaço é idêntica à frequência da carga elétrica oscilante que a gerou (Hewitt, 2015, p. 480).

Figura 2 - Esquema do espectro eletromagnético.



Fonte: Retirado de Vilas Boas, Doca, Biscuola (2012, p. 210).

3.1.2 - A investigação do problema da radiação térmica

Segundo Martins e Rosa (2014), o surgimento da Teoria Quântica está diretamente relacionado às investigações sobre o fenômeno da radiação emitida por um “corpo negro” — um corpo idealizado que, quando aquecido, emite radiação em diferentes faixas do espectro eletromagnético, como infravermelha, visível e ultravioleta. A seguir, o conceito de corpo negro será apresentado com maior detalhamento.

Sejam e a *potência emissiva*² e a a *absortividade* ou *absortância*³, o Princípio de Proporcionalidade entre emissão e absorção total, com dois corpos radiantes A e B, no equilíbrio térmico, estabelece que

$$\frac{e_A}{a_A} = \frac{e_B}{a_B} \quad (3.4)$$

Suponha que um dos corpos apresente a especificidade de que $a_N = 1$, ou seja o corpo N absorve toda a radiação que incide sobre ele. Daí, denominamos N de corpo negro (Studart, 2000).

Ainda segundo Martins e Rosa (2014), inicialmente foi desenvolvida a teoria dos calores específicos — e não do corpo negro — que chamou a atenção da comunidade científica para o problema da quantização de energia. Durante os primeiros vinte anos do século XX, cientistas como Planck, Einstein e Bohr contribuíram significativamente para o desenvolvimento da quântica e serão citados ao longo do texto.

Um corpo aquecido emite radiação eletromagnética em um amplo espectro contínuo de frequências, com intensidade variável que atinge um máximo em um determinado comprimento de onda. O Sol, cuja temperatura na superfície é de cerca de 6.000°C, é o exemplo mais conhecido de emissão de radiação térmica, cujo espectro abrange toda a região visível, incluindo ainda comprimentos de onda maiores (infravermelho) e menores (ultravioleta).

De maneira geral, matéria e radiação interagem atingindo o equilíbrio termodinâmico através de trocas de energia. Os corpos que emitem espectros térmicos de caráter universal, cujas superfícies absorvem toda a radiação térmica

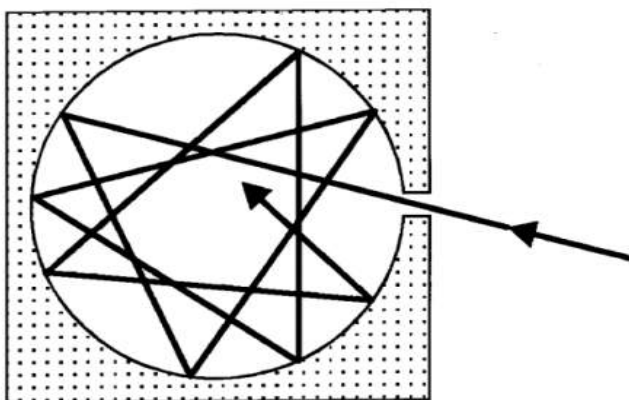
² Quantidade de energia radiante emitida por unidade de área e por unidade de tempo.

³ Fração de energia incidente sobre a superfície que é absorvida.

incidente sobre eles, são chamados de corpos negros. Esses corpos não refletem nem transmitem radiação e sua emissão depende exclusivamente de sua temperatura (Eisberg, Resnick, 1979).

Apesar de ser um corpo ideal, um corpo negro pode ser construído com boa aproximação utilizando uma caixa oca (como um forno) com paredes internas metálicas e uma pequena abertura para a passagem de radiação, conforme ilustrado na figura 3 a seguir. A caixa deve ser revestida com um excelente isolante térmico e espelhada externamente, refletindo toda a radiação incidente, exceto na abertura. A radiação que penetra na cavidade tem uma probabilidade muito pequena de escapar, permanecendo no interior, sendo espalhada pelas paredes até atingir o equilíbrio térmico. Desta forma, aproximamos que toda a radiação incidente é absorvida pelo corpo (Studart, 2000).

Figura 3 - Representação esquemática de um corpo negro.



Fonte: Retirado de Studart (2000, p. 524).

A distribuição de energia em um corpo negro foi estudada considerando a termodinâmica, a teoria eletromagnética e a mecânica estatística, mas seguiu sem solução. A *Lei do deslocamento de Wien*, proposta pelo físico Wilhelm Wien em 1896, foi uma tentativa da Física Clássica de explicar os fenômenos relacionados à radiação térmica. A lei descreve a relação entre a temperatura de um corpo negro e o comprimento de onda no qual a emissão de radiação é máxima, sendo fundamental para a compreensão do comportamento da radiação térmica e amplamente aplicada em astrofísica e em estudos sobre radiação térmica.

A origem do nome "lei de deslocamento" para apelidar a Lei de Wien deve-se ao fato de que o comprimento de onda, no qual a intensidade de radiação é máxima,

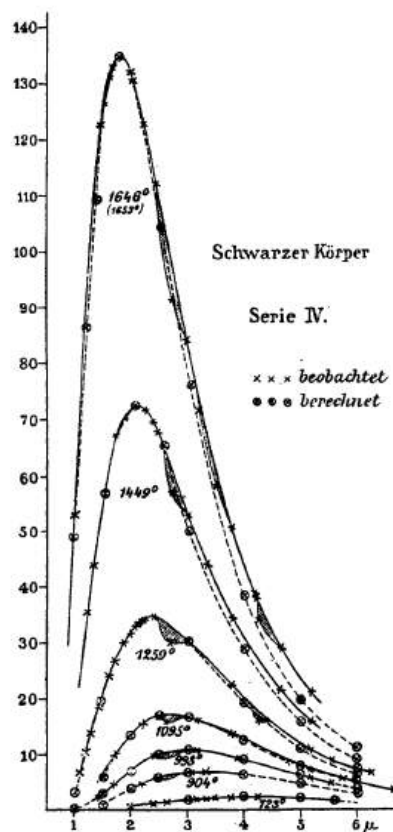
varia com a temperatura de acordo com a relação (3.5) a seguir. Na equação, λ representa o comprimento de onda com maior emissão, T é a temperatura e b representa uma constante.

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = b \quad \text{ou} \quad \lambda_{\text{máx}} \propto \frac{1}{T} \quad (3.5)$$

A equação (3.5) foi verificada experimentalmente inúmeras vezes, destacando os trabalhos do grupo de Friedrich Paschen (1865-1974) e do grupo de Otto Lummer (1860-1925) e seus colegas de laboratório: Ernst Pringsheim (1859-1917), Heinrich Rubens (1865-1922) e Ferdinand Kurlbaum (1857-1927).

O gráfico obtido por Lummer e Pringsheim em novembro de 1899 pode ser visto na figura 4 a seguir e apresenta a intensidade espectral como função do comprimento de onda (Studart, 2000).

Figura 4 - Intensidade espectral como função do comprimento de onda.



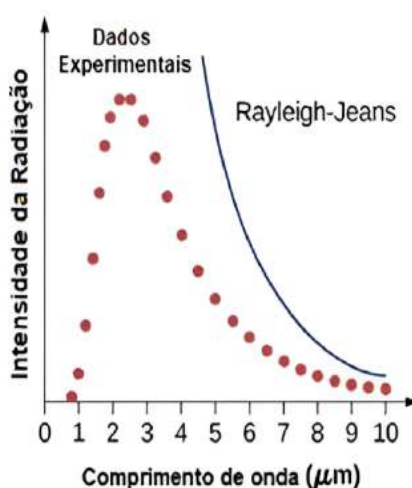
Fonte: Retirado de Studart (2000, p. 526).

O problema é que outros estudos subsequentes, com mais dados coletados, demonstraram que a Lei de Wien falhava para comprimentos de onda longos - baixas frequências - em uma ampla faixa de temperaturas (Studart, 2000).

Outra equação historicamente importante é a proposta no modelo de Lord Rayleigh (John William Strutt, 1842-1919), publicada em uma curta nota em junho de 1900. A lei de radiação de Rayleigh é conhecida como lei de Rayleigh-Jeans, após a contribuição de James Jeans (1877-1946), em maio de 1905.

A Lei de Rayleigh-Jeans funciona bem na região de baixas frequências (ou, equivalentemente, em grandes comprimentos de onda), mas falha no limite de altas frequências (ou pequenos comprimentos de onda), prevendo uma intensidade infinita na região do ultravioleta. Esse desvio teórico, incompatível com os dados experimentais, ficou conhecido como “catástrofe do ultravioleta”, nomeado por Paul Ehrenfest (1880–1933). A Figura 5 a seguir ilustra essa discrepância, comparando os resultados experimentais com a equação proposta por Rayleigh-Jeans, agora representada em função do comprimento de onda.

Figura 5 - Gráfico dos pontos experimentais (pontos vermelhos) e da previsão teórica da Física Clássica - Rayleigh e Jeans (linha sólida azul).



Fonte: Disponível em:

https://phys.libretexts.org/@api/deki/files/15627/CNX_UPhysics_39_01_rayleigh.jpg?revision=1.

Acesso em: 9 de julho de 2024.

A distribuição da energia da radiação térmica entre as diversas frequências já havia sido medida com precisão. No entanto, nenhuma teoria existente até então foi capaz de explicar adequadamente os resultados obtidos. Foi Max Planck quem, ao introduzir a quantização da energia por meio de artifícios matemáticos, conseguiu

fornecer uma solução inicial para o problema, abrindo caminho para o desenvolvimento da Física Quântica. Mesmo que a abordagem de Planck tenha sido inicialmente uma solução matemática, ela lançou as bases para uma nova compreensão dos fenômenos envolvendo radiação térmica.

3.1.3 - Planck e o início da quantização da energia

Os primeiros trabalhos sobre a quantização da energia foram apresentados por Planck, perante a Academia Alemã de Física, em 1900. Na primeira comunicação, Planck propôs uma nova fórmula para a distribuição espectral da radiação de corpo negro. Na segunda, introduziu a hipótese de quantização da energia, utilizando um método não-ortodoxo inspirado pelas ideias da mecânica estatística de Ludwig Boltzmann (1844-1906) (Studart, 2000).

Ele apresentou o artigo “Sobre a Teoria da Lei da Distribuição de Energia no Espectro Normal”, no qual tentou explicar as propriedades observadas da radiação térmica. Planck sugeriu que os osciladores harmônicos na superfície de um corpo negro possuem valores específicos de energia, expressos pela equação (3.6) a seguir, onde n é o número quântico inteiro, h é a constante de Planck, e f é a frequência do oscilador (Eisberg, Resnick, 1979).

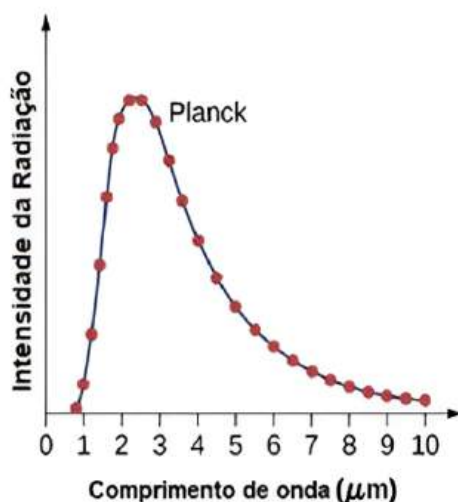
$$E = n.h.f \quad (3.6)$$

Planck apresentou essa teoria audaciosa, que conflitava com a Física Clássica, considerando que osciladores harmônicos simples só podiam ter determinados valores discretos de energia. Inicialmente, essa solução apareceu como um mero artifício matemático utilizado por Planck, sem uma intenção conceitual explícita de quantização da energia. O físico, ao resolver o problema, afirmou que “após algumas semanas do mais extenuante trabalho da minha vida, a escuridão se desfez e uma inesperada vista começou a surgir” (Studart, 2000, p. 524).

A proposta de Planck mostrou-se coerente com os dados experimentais da época, como ilustrado na Figura 6. Ao dividir a energia em “quanta”, ele conseguiu explicar a distribuição da radiação térmica, que até então não era adequadamente descrita pelas teorias clássicas. Esse avanço consolidou sua proposta e forneceu

uma base experimental sólida para o que viria a ser um dos pilares da Física Quântica.

Figura 6 - Resultado teórico de Planck (curva contínua) e curva experimental de radiação do corpo negro (pontos).



Fonte: Disponível em:

https://phys.libretexts.org/@api/deki/files/15625/CNX_UPhysics_39_01_planck.jpg?revision=1.

Acesso em: 9 de julho de 2024.

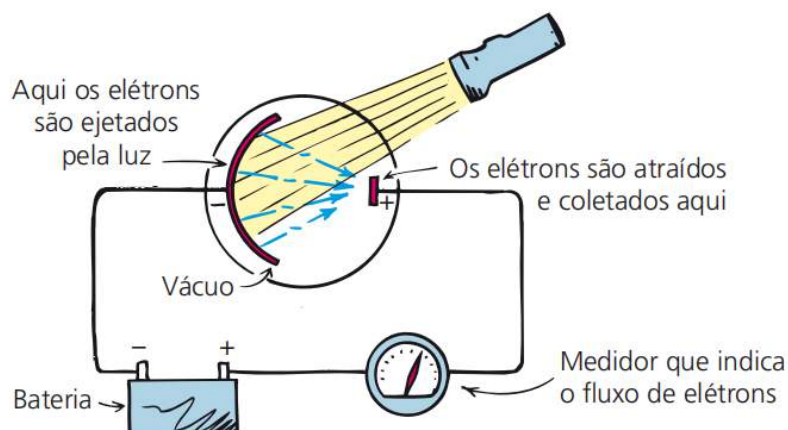
No contexto da radiação do corpo negro, Planck formulou sua hipótese ao considerar que matéria e radiação interagem e atingem o equilíbrio termodinâmico por meio da troca discreta de energia, o que levou à introdução da quantização da energia (Studart, 2000).

3.1.4 - 1905 e o artigo de Einstein sobre o efeito fotoelétrico

A primeira observação relacionada ao efeito fotoelétrico foi feita pelo físico russo Alexander Stoletov (1839-1896), em 1872. Entre os anos de 1886 e 1887, Heinrich Hertz realizou experimentos que confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas e corroboraram a teoria de Maxwell sobre a natureza da luz (Eisberg, Resnick, 1979). Hertz observou experimentalmente que a descarga elétrica entre dois eletrodos era facilitada pela incidência de luz ultravioleta em um deles.

A figura 7 a seguir mostra um esquemático mais atual usado para estudar o efeito fotoelétrico. Uma luz monocromática incide sobre uma placa de metal e libera elétrons, chamados de *fotoelétrons*.

Figura 7 - Um esquema experimental usado para observar e medir o efeito fotoelétrico.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 488).

Eisberg e Resnick (1979) destacam três pontos principais do efeito fotoelétrico que não podem ser explicados pela teoria ondulatória clássica da luz:

i) A energia cinética máxima dos fotoelétrons não depende da intensidade da luz. A teoria ondulatória clássica requer que a amplitude do campo elétrico oscilante E da onda luminosa aumente se a intensidade da luz for aumentada. Isso sugere que a energia cinética dos fotoelétrons deveria também aumentar com o aumento da intensidade do feixe luminoso, porém isso não é observado experimentalmente.

ii) O efeito fotoelétrico só ocorre acima de uma frequência mínima específica, independentemente da intensidade, chamada frequência de corte. De acordo com a teoria ondulatória, o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência de luz, desde que tivesse uma intensidade mínima para ejetar os elétrons. Entretanto, experimentos mostram que, para cada superfície, há um limiar de frequência característico.

iii) Na teoria ondulatória, a energia luminosa está uniformemente distribuída sobre a frente de onda. Portanto, se a luz for suficientemente fraca, deveria haver um intervalo de tempo mensurável entre o instante em que a luz começa a incidir sobre a superfície e a ejeção do fotoelétron. No entanto, a absorção de energia da luz ocorre em uma área limitada e em um tempo muito curto, contrariando a distribuição uniforme esperada. Nenhum retardamento detectável foi medido.

Em 1905 Einstein publica no periódico *Annalen der Physik* o artigo que hoje é conhecido como um estudo sobre o efeito fotoelétrico - emissão pela matéria de elétrons em movimento devido à interação com uma radiação (Martins,Rosa, 2014). Assim, uma radiação eletromagnética passou a ser tratada como um feixe de partículas denominadas *fótons* propagando-se.

Einstein supôs que a energia de um fóton (quantum) é localizada e que pode ser calculada por:

$$E = h.f \quad (3.7)$$

A equação (3.8) do efeito fotoelétrico relaciona energia cinética máxima ($K_{\text{máx}}$) do fotoelétron emitido com a energia do fóton incidente e uma energia característica do metal chamada *função trabalho* (w_0). A função trabalho é a energia mínima necessária para um elétron “escapar” do metal.

$$K_{\text{máx}} = h.f - w_0 \quad (3.8)$$

Segundo Martins e Rosa (2014, p. 44), Einstein propõe que “[...] a radiação só poderia ser emitida e absorvida pela matéria através de quantidades bem definidas de energia $h.f$ e a própria luz seria constituída por esses *quanta de energia*”. Essa proposta de Einstein pode ser encarada como um modelo corpuscular para a natureza da luz.

Em 1911, ocorreu o primeiro Congresso Solvay de Física, inteiramente dedicado à questão dos *quanta*. Em 1912, após o congresso, Henri Poincaré publicou trabalhos sobre o assunto, e em 1913, Niels Bohr aplicou essa ideia em sua teoria sobre o átomo (Martins, Rosa, 2014).

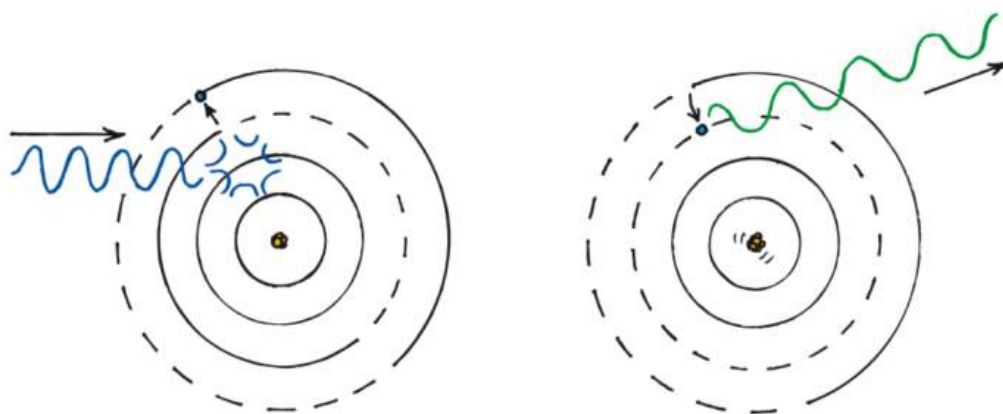
Segundo Santos (2018), Robert Andrews Millikan dedicou mais de uma década a experimentos sobre o efeito fotoelétrico e obteve, pela primeira vez, um valor experimental para a constante de Planck. Ele determinou h com uma precisão de aproximadamente 0,5%, valor muito próximo do obtido a partir da fórmula da radiação de Planck. Seu trabalho de 1916, relacionado à medição experimental da constante de Planck no efeito fotoelétrico, foi fundamental para a conquista do Prêmio Nobel de Física em 1923.

Após a confirmação experimental da proposta de Einstein por Millikan, Albert Einstein foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1921, pela explicação teórica do efeito fotoelétrico (Eisberg, Resnick, 1979).

3.1.5 - 1913 e o novo modelo para a Matéria de Bohr

Segundo Eisberg e Resnick (1979), foi o problema da instabilidade do átomo que levou Niels Bohr, em 1913, a propor seu modelo atômico. Ele obteve seu doutorado em 1911 e trabalhou inicialmente no laboratório de J. J. Thomson - descobridor do elétron - no Trinity College, Cambridge, e foi orientando de Ernest Rutherford na Universidade de Manchester. Rutherford havia descoberto o núcleo atômico, o que levou Bohr a incorporar princípios quânticos ao modelo atômico. Em 1913, Bohr propõe que os elétrons se movem em órbitas definidas ao redor do núcleo (Figura 8) e emitem ou absorvem luz ao saltarem entre essas órbitas. Esse modelo explicou as linhas espectrais do hidrogênio e outras séries.

Figura 8 - Modelo de camadas do átomo de Bohr representando os processos de absorção (esq.) e emissão (dir).



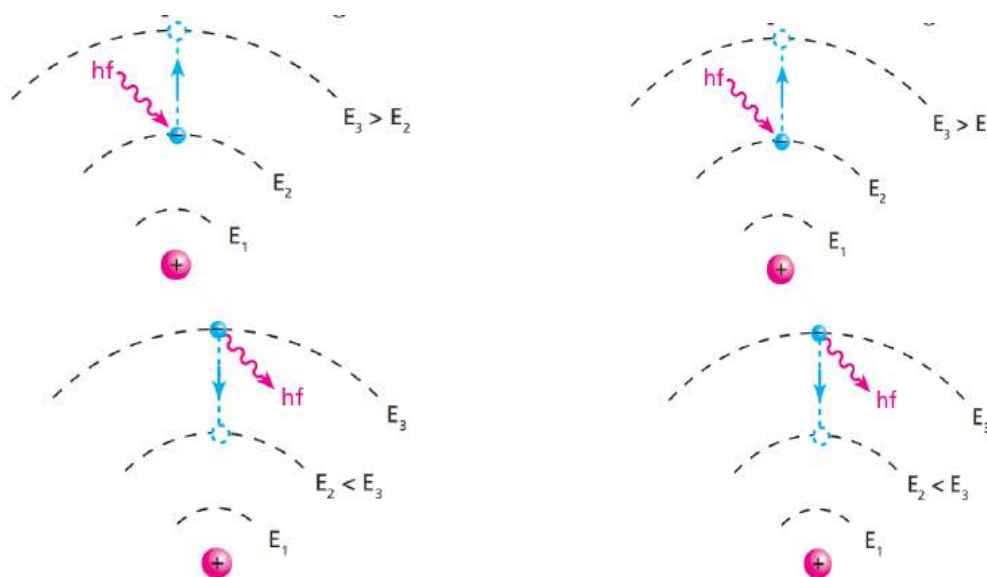
Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 570).

Bohr postulou que, para a eletrosfera de um átomo manter-se estável, os elétrons desse átomo só podem ocupar determinados níveis de energia, denominados estados estacionários ou quânticos. Cada um desses estados corresponde a uma energia específica. Em seu modelo, Bohr propôs que, em um estado estacionário, o átomo não emite radiação. Assim, sua eletrosfera mantém-se estável.

Além disso, o estado estacionário no qual os elétrons estão nos níveis mais baixos de energia é chamado de estado fundamental. Os demais estados permitidos são denominados estados excitados. Somente o estado fundamental e os estados excitados bem definidos são permitidos; qualquer outro estado é proibido (Biscuola, Doca, Villas Bôas, 2012).

Bohr também postulou que, quando um elétron passa de um estado estacionário para outro, ele emite ou absorve um *quantum* de energia igual à diferença entre as energias desses estados, o chamado salto quântico - ilustrado na figura 9.

Figura 9 - (esq.) Elétron absorvendo um *quantum* de Energia $h.f$ e mudando para um estado mais externo. (dir.) Elétron emite um *quantum* de energia $h.f$ ao retornar para seu estado.

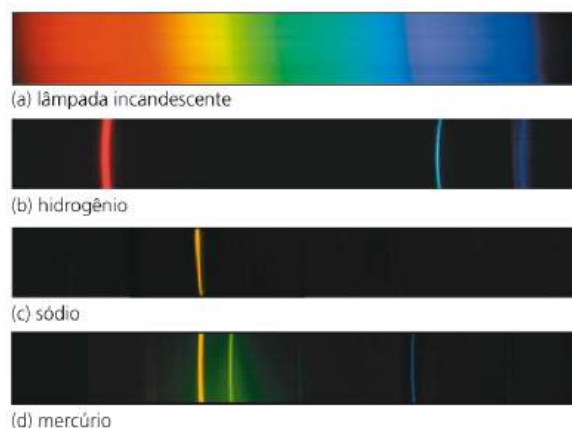


Fonte: Retirado de Biscuola, Doca, Villas Bôas (2012, p.348).

3.1.6 - Espectrógrafo e estudo dos espectros

Vamos entender melhor o que são as linhas espectrais, que também foram mencionadas como fontes de investigação no tópico anterior. Cada elemento químico possui um padrão único de níveis de energia eletrônicos, o que faz com que emita luz com um **espectro de emissão** característico quando excitado. Alguns exemplos de espectros de emissão podem ser vistos na figura 10 a seguir.

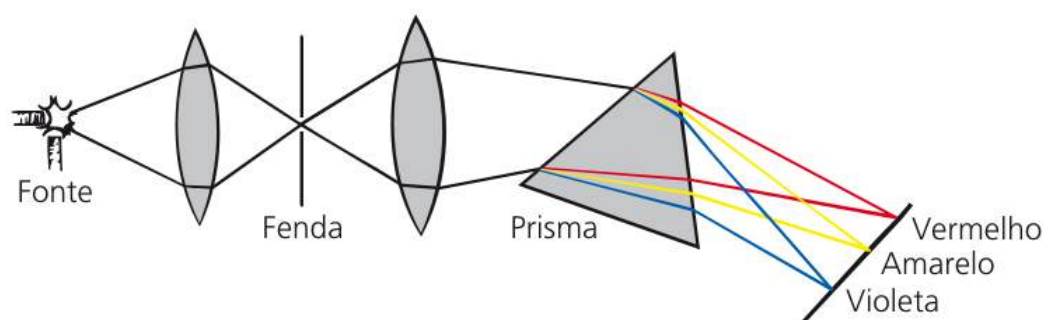
Figura 10 - Espectros de diferentes fontes.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 567).

Este padrão é visível ao passar a luz através de um prisma ou rede de difração, especialmente se a luz primeiro atravessar uma fenda estreita e depois for focada através de um prisma sobre uma tela (Hewitt, 2015, p. 566). Este arranjo de fenda, lente de focagem e prisma (ou rede de difração) forma um espectroscópio, um dos instrumentos mais úteis na ciência moderna e que pode ser visto no esquema da figura 11 a seguir.

Figura 11 - Um espectroscópio simples. As imagens da fenda iluminada são projetadas em uma tela, criando um padrão de linhas. O espectro resultante é específico para a luz que ilumina a fenda.



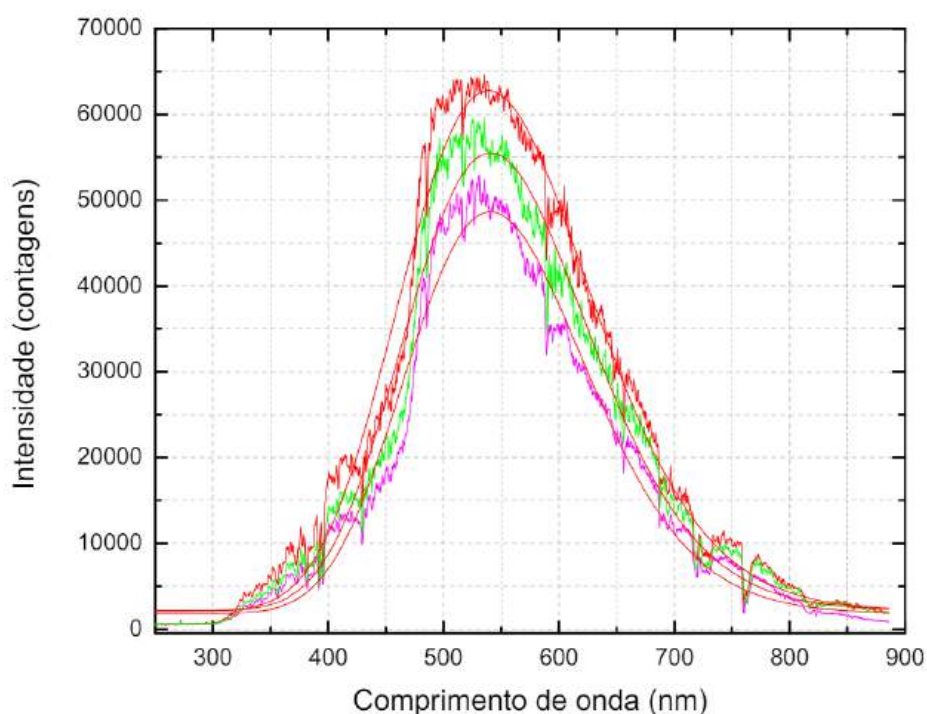
Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 566).

Com a utilização de um espectrógrafo, podemos produzir um gráfico do espectro solar que revela a distribuição da radiação em diferentes comprimentos de onda. Para fins de estimativa, consideramos o Sol como um corpo negro idealizado, o que permite aplicar a Lei de Deslocamento de Wien. Com isso, é possível estimar a temperatura superficial do Sol ao identificar o comprimento de onda no qual ocorre

a emissão máxima de radiação. Dessa forma, a aplicação prática da teoria possibilita a determinação de uma das principais características estelares, como a temperatura da superfície do Sol.

O gráfico apresentado a seguir (figura 12) para o espectro solar foi produzido pelo autor utilizando um espectrógrafo no Laboratório de Física Moderna do IFGW/UNICAMP. No gráfico, três medidas do espectro são exibidas, com a intensidade máxima situada entre 500 nm e 550 nm.

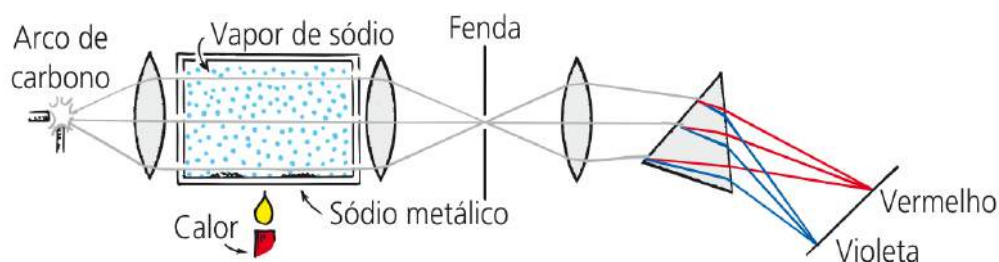
Figura 12 - As três melhores medidas do espectro solar, realizadas às 16h do dia 31/10/2018. As linhas em vermelho são os ajustes utilizando o LogNormal no Origin.



Fonte: Autor.

Quando observamos a luz branca de uma fonte incandescente com um espectroscópio, vemos um espectro contínuo que forma um arco-íris completo de cores. No entanto, se colocarmos um gás entre a fonte e o espectroscópio, um exame cuidadoso revelará que o espectro não é completamente contínuo. Em vez disso, aparece um **espectro de absorção**, no qual linhas escuras são distribuídas ao longo do espectro. Essas linhas escuras, vistas contra o fundo colorido do arco-íris, são como as linhas de emissão em negativo e são chamadas de linhas de absorção. Um arranjo possível pode ser visto na figura 13 a seguir.

Figura 13 - Um arranjo experimental para demonstrar o espectro de absorção de um gás.

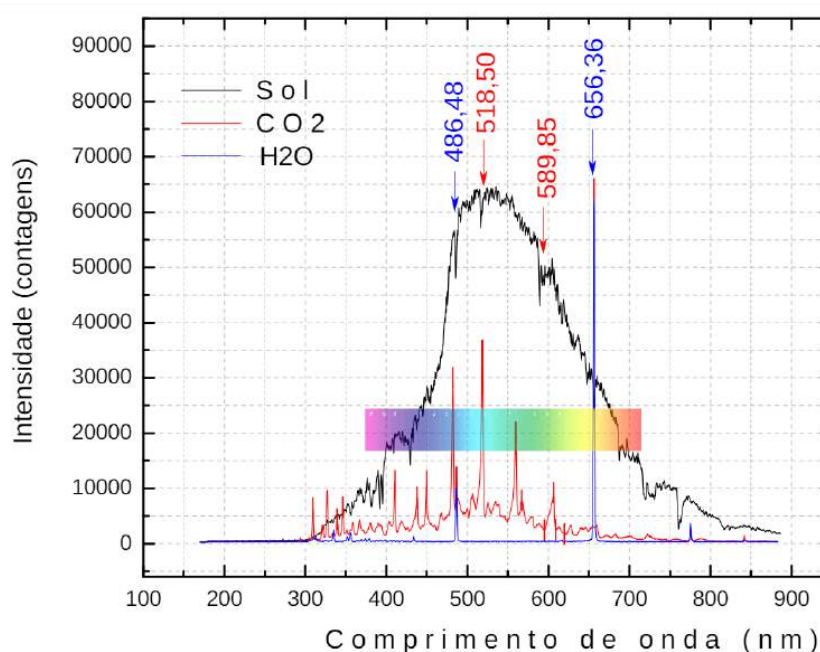


Fonte: Retirado de Hewitt (p.569, 2015).

No espectro observado, essas frequências absorvidas aparecem como linhas escuras, correspondendo exatamente às posições das linhas de emissão do mesmo gás. Embora o Sol seja uma fonte de luz incandescente, seu espectro contém muitas linhas de absorção, chamadas de linhas de Fraunhofer, em homenagem ao óptico e físico Joseph von Fraunhofer. Essas linhas indicam que o Sol e as estrelas possuem uma atmosfera de gases mais frios que absorvem algumas frequências da luz. A análise dessas linhas permite determinar a composição química dessas atmosferas, revelando que os elementos presentes nas estrelas são os mesmos que existem na Terra. Em 1868, análises espectroscópicas do Sol revelaram a existência de hélio, que foi descoberto no Sol antes de ser identificado na Terra (Hewitt, 2015, p.569).

Na figura 14 podemos ver o espectro solar comparado ao espectro visível e com as linhas de absorção do CO_2 e do H_2O . Note que o Sol tem picos negativos correspondente aos comprimentos de onda de 486,48 nm e 656,36 nm, o que significa que o vapor de água presente na atmosfera terrestre absorveu essa energia; os picos negativos do sol correspondente aos comprimentos de onda de 518,50 nm e 589,85 nm significa que o dióxido de carbono presente na atmosfera absorveu a energia desses fótons.

Figura 14 - Em preto: espectro do Sol (16h), em vermelho: espectro do CO₂, em azul: espectro de H₂O, com foque na região do visível.



Fonte: Autor.

O estudo dos espectros, viabilizado pelo uso de espectrógrafos e espectroscópios, é de fundamental importância para a compreensão das propriedades físicas e químicas dos corpos celestes. A análise das linhas espectrais de emissão e absorção permite identificar os elementos presentes em estrelas e atmosferas, revelando informações essenciais sobre sua composição e dinâmica. A precisão dessa metodologia faz do espectro uma "assinatura" única para cada elemento, tornando o estudo espectral uma ferramenta indispensável na astrofísica.

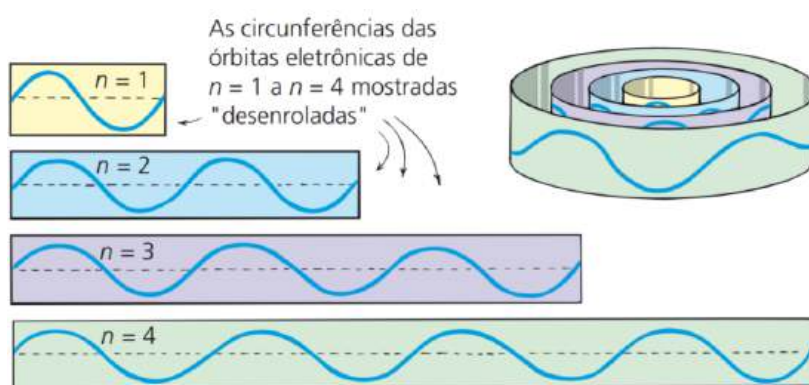
3.1.7 - Ondas de matéria de De Broglie

As discussões do físico experimental Maurice de Broglie sobre a natureza corpuscular da luz encantaram seu irmão Louis de Broglie e o inspiraram trocar de carreira, mudando da História para Física. Em 1924, Louis de Broglie publicou sua tese de doutorado na qual apresentou a hipótese das **ondas de matéria**, que sofreriam os mesmos fenômenos das outras ondas, como reflexão, difração e interferência. A razão para que o elétron ocupe apenas níveis discretos de energia é compreendida considerando-se que ele se comporte como uma onda, e não como uma partícula (Eisberg, Resnick, 1979).

Segundo Eisberg e Resnick (1979), a hipótese de de Broglie era de que o comportamento dual da radiação também se aplicava à matéria. Ou seja, se um fóton tem uma onda associada, uma partícula material, como um elétron, também tem associada a ela uma onda de matéria que governa seu movimento.

De Broglie demonstrou que os valores discretos dos raios das órbitas de Bohr são uma consequência natural de “ondas de elétrons” estacionárias. Ele mostrou que existe uma órbita de Bohr na qual uma onda eletrônica se fecha sobre si mesma, tornando-se uma onda estacionária, como em uma corda vibrante de um instrumento musical. Nessa visualização, o elétron não é concebido como uma partícula localizada em um ponto específico no interior do átomo, mas como uma onda estacionária ao redor do núcleo atômico, com um número inteiro de comprimentos de onda ajustando-se exatamente às circunferências das órbitas (Hewitt, 2015). Essa abordagem é válida especialmente para o átomo de hidrogênio, cuja simplicidade permite tal representação. No entanto, para átomos com múltiplos elétrons, torna-se necessário recorrer à equação de Schrödinger, que oferece uma descrição mais completa e precisa dos estados eletrônicos. Esta ideia do número inteiro de comprimento de onda pode ser exemplificada – de forma simplificada – no esquema da Figura 15 a seguir.

Figura 15 - Esquema simplificado para ilustrar as órbitas eletrônicas de um átomo que possuem raios discretos, porque as suas circunferências são números múltiplos inteiros do comprimento de onda do elétron.



Fonte: Retirado de Hewitt (p.569, 2015).

De Broglie propôs que para qualquer corpo em movimento existe um comprimento de onda λ associado, que depende da massa relativística m e velocidade v . Essa equação - chamada relação de De Broglie - pode ser vista a seguir. Ela calcula o comprimento de onda de De Broglie.

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (3.9)$$

Assim, a cada comprimento de onda de um fóton está associada uma intensidade de sua quantidade de movimento (p). Em 1927, a teoria foi confirmada pela primeira vez em um experimento no qual se determinou o comprimento de onda de elétrons que sofreram difração. Ou seja, foram detectados comportamentos ondulatórios em elétrons (Biscuola, Doca, Villas Bôas, 2012).

Segundo Eisberg e Resnick (1979), essa onda associada à matéria é observada apenas no limite quântico, para corpos muito pequenos. Por exemplo, para um elétron com energia cinética de 100 eV, temos um comprimento de onda $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-10}$ m. Já para uma bola de beisebol, movendo-se a uma velocidade de 10 m/s, o $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-35}$ m. Ou seja, para corpos com massas “grandes”, o comprimento de onda associado é extremamente pequeno, o que limita a extensão de aplicação dos conceitos quânticos.

Neste momento a Física Quântica pode parecer confusa devido ao comportamento dual das partículas. Ondas luminosas, que produzem interferência e sofrem difração, entregam energia como “pacotes” corpusculares, os *quanta*. Elétrons, que se movem em linhas retas e colidem como partículas, formam padrões de interferência como ondas. Esse comportamento gera um conflito na explicação da natureza da luz, pois ela parece exibir uma natureza tanto corpuscular quanto ondulatória. Contudo, há uma ordem subjacente: luz e elétrons exibem características de onda e partícula. Niels Bohr formulou a ideia de **complementaridade**, segundo a qual os fenômenos quânticos exibem propriedades complementares (mutuamente exclusivas) – revelando-se como partículas ou como ondas – dependendo do tipo de experimento que esteja sendo realizado, nunca exibindo os dois comportamentos ao mesmo tempo (Biscuola, Doca, Villas Bôas, 2012).

3.2 - BREVE HISTÓRIA SOBRE A NATUREZA DA LUZ E FENÔMENOS LUMINOSOS

A Física clássica distingue dois tipos de fenômenos: partículas e ondas. Partículas são pequenos objetos com massa que seguem as leis de Newton, movendo-se em linhas retas a menos que uma força as desvie. Ondas, como as do oceano, se propagam através do espaço e sofrem difração e interferência ao encontrarem obstáculos. Essas propriedades distinguem claramente partículas de ondas, que parecem ser mutuamente exclusivas. Contudo, a classificação da luz como partícula ou onda foi um enigma por séculos (Hewitt, 2015).

Desde a Antiguidade, várias teorias tentaram explicar a natureza da luz. Platão acreditava que a luz consistia em raios emitidos pelo olho, visão compartilhada por Euclides um século depois. Os pitagóricos, por outro lado, defendiam que a luz era composta de partículas minúsculas emitidas por corpos luminosos. Empédocles sugeriu que a luz era formada por ondas de alguma espécie e muito velozes (Hewitt, 2015).

Em 1704, Isaac Newton descreveu a luz como uma corrente de partículas ou corpúsculos, apesar de reconhecer propriedades ondulatórias. Christian Huygens, contemporâneo de Newton, defendia a teoria ondulatória da luz. Com esse histórico, Thomas Young realizou, em 1801, o experimento da fenda dupla, que parecia provar a natureza ondulatória da luz.

Essa visão foi reforçada pela previsão de Maxwell, em 1862, de que a luz transporta energia em campos elétrico e magnético oscilantes. Em 1887, Heinrich Hertz demonstrou a realidade das ondas eletromagnéticas usando circuitos elétricos que produziam faíscas. (Hewitt, 2015).

De acordo com Hewitt (2015), em 1900 Max Planck propôs que a energia era emitida em quantidades discretas, chamadas de *quanta*, com energia proporcional à frequência da radiação. Essa ideia revolucionou a física e marcou o início da Teoria Quântica (ver Seção 3.1.3, na qual esse tema é discutido com maior profundidade). O conceito ganhou força em 1905, quando Albert Einstein publicou um artigo argumentando que a luz interage com a matéria em pequenos "pacotes" de energia, chamados *fótons*, desafiando a visão exclusivamente ondulatória da luz.

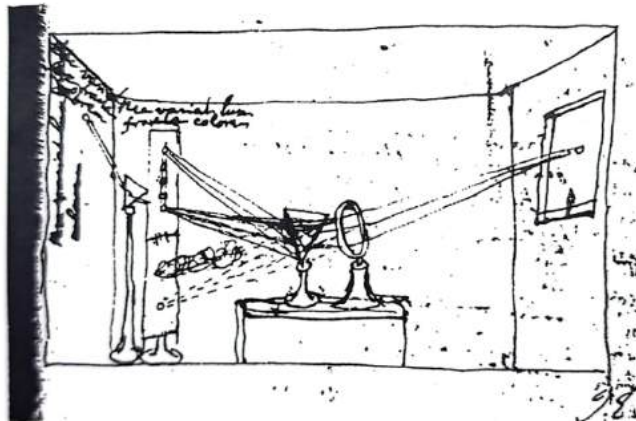
3.2.1 - Contribuições de Isaac Newton para a compreensão da natureza da luz

A resposta de um material à incidência de luz depende da frequência da luz e da frequência natural dos elétrons no material. A luz visível oscila a uma frequência muito alta, cerca de 100 trilhões de vezes por segundo (maior que 10^{14} Hz). Para que um objeto eletrizado responda a essas vibrações rápidas, ele deve ter pouca inércia. Como a massa dos elétrons é muito pequena, eles conseguem vibrar nessa frequência. A maioria das coisas ao nosso redor é opaca – absorvem a luz sem reemitir-lá. Livros, escrivaninhas, cadeiras e pessoas são opacos. As vibrações comunicadas a seus átomos ou moléculas pela luz são transformadas em energia cinética aleatória, ou seja, em energia interna, fazendo com que os corpos se tornem ligeiramente mais quentes. (Hewitt, 2015).

Isaac Newton ganhou fama inicialmente por seus estudos sobre a luz, antes mesmo de suas leis do movimento e da gravitação universal. Por volta de 1665, ao observar imagens de corpos celestes formadas por uma lente, ele notou colorações nas bordas das imagens. Para investigar esse fenômeno, Newton escureceu um quarto, deixando a luz solar entrar apenas por uma pequena abertura circular na janela, projetando uma mancha luminosa na parede oposta. Ao colocar um prisma triangular de vidro no feixe de luz, ele observou que a luz branca se separava nas cores do arco-íris. Um esquemático do experimento descrito pode ser visto na figura 16, a seguir.

Newton demonstrou que a luz branca é composta por todas as cores do arco-íris e que o arco-íris resulta da dispersão da luz solar em pequenas gotas de água no céu. Ele também descobriu que as cores dispersas podiam ser recombinadas para formar luz branca novamente ao utilizar um segundo prisma (Hewitt, 2015, p. 492).

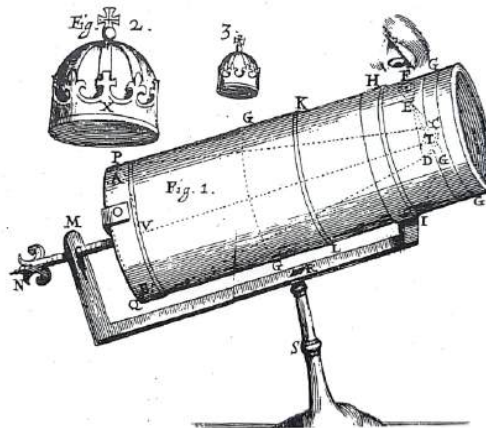
Figura 16 - Esquema original proposto para o experimento de Newton com os prismas.



Fonte: Retirado de Newton (p. 66, 2017)

Em reconhecimento por seus trabalhos, como o estudo da luz, Newton foi eleito membro da Royal Society de Londres. Na academia, ele apresentou o primeiro telescópio refletor do mundo em 1671, que ainda pode ser visto na biblioteca da Royal Society. Um esquema do telescópio projetado por Newton pode ser visualizado na figura 17.

Figura 17 - Na figura, as duas coroas são o mesmo objeto visto a 90 metros de distância pelo telescópio refletor de Newton (fig.2) e por um telescópio refrator (fig.3) como 61 cm de comprimento (que aumentava 14 vezes).



Fonte: Retirado de Newton (2017, p. 103)

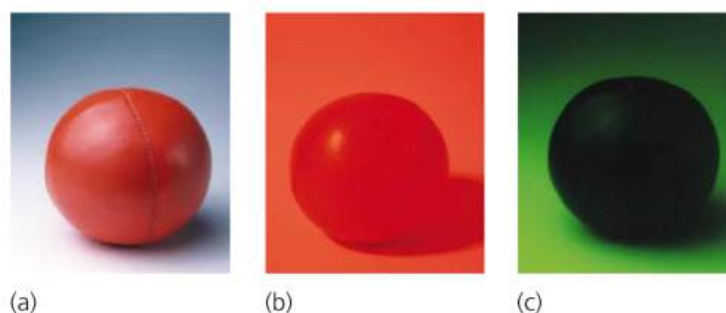
3.2.2 - Teoria das Cores e Reflexão da luz

Para os físicos, as cores dos objetos não estão nas substâncias dos próprios objetos, nem na luz que eles emitem ou refletem, mas são uma experiência fisiológica que ocorre no olho do espectador a partir da frequência da luz incidente.

As cores que percebemos dependem da frequência da luz incidente. Luzes com diferentes frequências são percebidas como diferentes cores; a luz de frequência mais baixa que podemos detectar aparece como vermelha, e a de frequência mais alta como violeta. Entre essas duas extremidades, há uma faixa de matizes que formam o espectro de cores de um arco-íris. Por convenção, esses matizes são agrupados em sete cores: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, índigo e violeta. Juntas, essas cores formam a luz branca. A luz branca do Sol é uma composição de todas as frequências visíveis, além de incluir outras frequências fora da faixa visível, como o ultravioleta e o infravermelho (Hewitt, 2015).

A maioria dos objetos ao nosso redor reflete luz melhor do que a emite, refletindo apenas parte da luz incidente, responsável por suas cores. A luz é refletida pelos objetos de forma semelhante ao som emitido por um diapasão e refletido em um objeto próximo. Átomos e moléculas funcionam de maneira similar: os elétrons mais externos oscilam devido aos campos elétricos das ondas eletromagnéticas, emitindo suas próprias ondas. Materiais diferentes têm frequências naturais distintas para absorver e emitir radiação. Nas frequências de ressonância, a luz é absorvida, enquanto em frequências fora da ressonância, a luz é reemitida, constituindo a reflexão. Normalmente, um material absorve luz de certas frequências e reflete o restante, aparecendo na cor da luz refletida (Hewitt, 2015).

Figura 18: (a) A bola vermelha vista sob luz branca. (b) A bola vermelha vista sob luz vermelha. (c) A bola vermelha vista sob luz verde.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 506).

A aparência de um objeto colorido depende das frequências presentes na luz que o ilumina. Podemos ver essa relação luz x objeto na figura 18, na qual uma bola vermelha é iluminada por três diferentes fontes de luz. Um objeto só pode refletir as frequências presentes na luz incidente. Por exemplo, uma lâmpada incandescente

emite mais luz em frequências mais baixas, intensificando os tons vermelhos. Normalmente, definimos a cor "verdadeira" de um objeto como a cor que ele exhibe sob a luz solar (Hewitt, 2015).

3.2.3 - Misturando cores: RGB e óptica da visão

Nesta seção, faremos uma breve discussão a respeito das cores, dos sistemas de representação cromática (RGB e CMY) e de algumas de suas aplicações. Como já apresentado anteriormente, as explicações para os fenômenos relacionados à luz passaram a se tornar mais precisas a partir do século XVII, com Isaac Newton, responsável por um grande avanço no estudo da óptica.

A teoria de Newton sobre a luz e as cores teve grande impacto na história da ciência ao demonstrar que a luz branca, ao passar por um prisma, decompõe-se em diferentes cores do espectro - esquemático apresentado anteriormente na figura 16. Essa descoberta contrariava concepções anteriores, que atribuíam a coloração da luz a modificações causadas por meios externos. Newton estabeleceu as cores do espectro visível com base na decomposição da luz solar, defendendo a existência de três cores primárias da luz: vermelho, verde e azul (RGB). No campo dos estudos cromáticos, seus trabalhos são considerados um marco no desenvolvimento da ciência da cor. A chamada ciência da cor está inserida na Teoria da Cor e é definida como o estudo dos aspectos físicos da cor (Silveira, 2015).

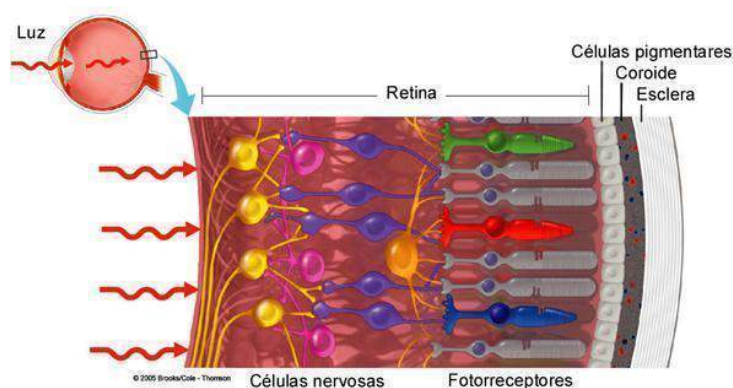
Segundo Silveira (2015), surge nesse contexto um nome importante na literatura que se dedicou ao estudo do fenômeno das cores: Johann Wolfgang von Goethe. O poeta e pensador do século XVIII opôs-se à concepção newtoniana da luz, fazendo duras críticas e argumentando que a teoria proposta por Newton não explicava satisfatoriamente os fenômenos perceptivos relacionados às cores. Para Goethe, a cor era um fenômeno que envolvia a interação entre luz, escuridão e percepção humana, e não apenas uma decomposição objetiva da luz. Sua crítica, portanto, não era apenas científica, mas também filosófica e estética, como desenvolvido em sua obra *Doutrina das Cores*.

Essa divergência entre Newton e Goethe reflete uma diferença mais profunda entre duas formas de compreender o mundo: a abordagem objetiva, experimental e matemática de Newton, e a abordagem subjetiva, fenomenológica e perceptiva de Goethe. Enquanto o cientista analisava a luz por meio de instrumentos ópticos e

cálculos, o poeta observava como as cores se manifestavam ao olhar humano. Essa disputa ecoa até os dias atuais em discussões sobre sistemas de cores como RGB e CMY: o primeiro, baseado na adição de luz (como ocorre em telas e dispositivos eletrônicos); o segundo, na subtração de pigmentos (como ocorre em materiais impressos). Como mostra Silveira (2015), parte da confusão histórica sobre as cores decorre justamente dessa distinção entre as cores do espectro (luz) e as cores dos pigmentos, percebidas de maneira diferente pelo sistema visual humano. A oposição entre as visões de Newton e Goethe ilustra, portanto, a complexidade do fenômeno cromático, que envolve tanto aspectos físicos quanto sensoriais e culturais.

Para compreender esses processos, é necessário olhar para a composição do olho humano. A Figura 19 apresenta os detalhes estruturais da retina, composta basicamente por células nervosas e fotorreceptores. Dentre esses, destacam-se os cones e os bastonetes. Os cones — divididos em três tipos, sensíveis às faixas do vermelho, verde e azul — são responsáveis pela percepção das cores. Já os bastonetes, representados na figura em cinza, são sensíveis às variações de luminosidade, sendo responsáveis pela visão em tons de cinza, bem como pela visão periférica.

Figura 19 - Esquemático do olho humano.



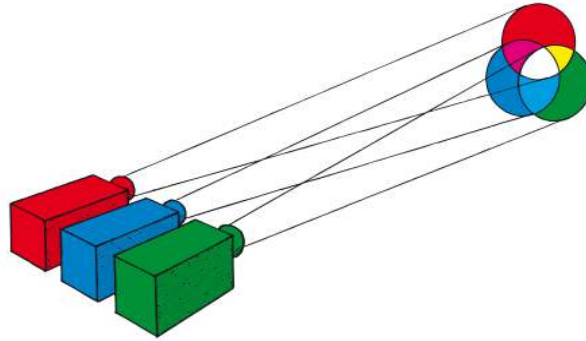
Fonte: Disponível em:

https://www2.ibb.unesp.br/nadi/Museu2_qualidade/Museu2_corpo_humano/Museu2_como_funciona/Museu_homem_nervoso/Museu_homem_nervoso_visao/Museu2_homem_nervoso_visao_mecanismo.htm. Acesso em: 25 maio 2024.

Ou seja, nossa visão é triclômica; vemos todas as cores baseadas em apenas três: o vermelho, o azul e o verde; além da escala de cinza. O sistema baseado nas três cores que sensibilizam nossos cones é chamado de RGB (Red, Green and Blue) - trad. vermelho, verde e azul. O RGB trabalha por adição de cores, ou seja, se

somarmos as três cores básicas, nas proporções corretas, obteremos a cor branca - figura 20 (Hewitt, 2015).

Figura 20: A mistura de luzes coloridas. Quando três projetores emitem luzes vermelha, verde e azul sobre uma tela branca, as áreas de superposição produzem diferentes cores. O branco é gerado onde as três luzes se sobrepõem.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 506).

A Figura 21 ilustra um experimento com três lâmpadas RGB projetando suas cores na parede branca, criando uma "sombra colorida". Este experimento demonstra o sistema de cores RGB (vermelho, verde e azul) e suas complementares CMY (ciano, magenta e amarelo), permitindo a visualização prática de como essas cores se combinam e interagem para formar outras cores.

Figura 21: Experimento realizado utilizando 3 lâmpadas RGB.

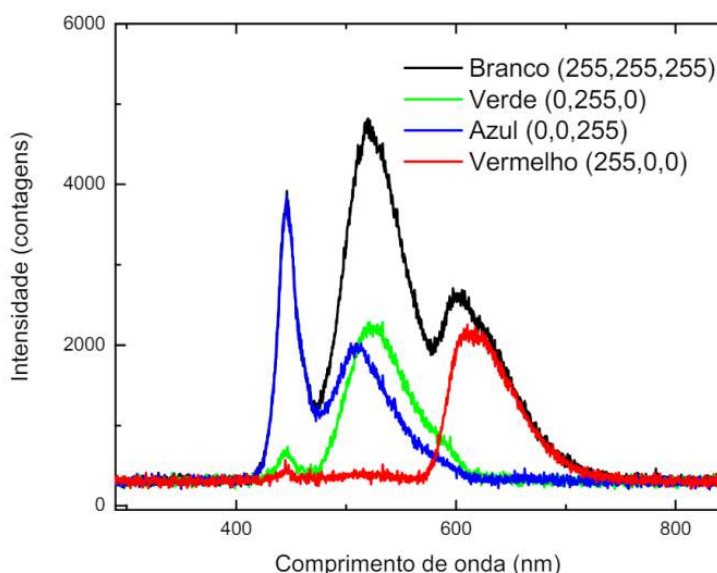


Fonte: Autor.

A Figura 22 apresenta outro exemplo de composição da luz: o espectro coletado das três cores emitidas por um monitor RGB (vermelho, verde e azul) e da cor branca. No gráfico, observa-se que a cor branca é resultante da sobreposição

das cores RGB, evidenciando como a combinação dessas três cores primárias gera a luz branca.

Figura 22 - Espectro coletado das principais cores de um monitor RGB e do Branco.

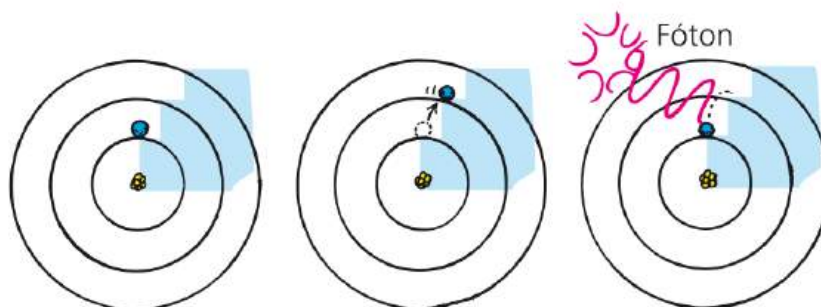


Fonte: Autor.

3.2.4 - Fluorescência, Fosforescência e Bioluminescência

A emissão de luz atômica envolve transições de elétrons de estados de maior energia para estados de menor energia dentro dos átomos. Esse processo pode ser entendido, de forma simplificada, pelo modelo planetário do átomo proposto por Bohr. Embora esse modelo funcione bem para o átomo de hidrogênio e seja útil como representação introdutória, os níveis atômicos, de forma mais precisa, são explicados pela equação de Schrödinger, que descreve os estados de energia a partir da solução da função de onda eletrônica. Cada elemento é caracterizado pelo número de elétrons em suas camadas ao redor do núcleo, possuindo um padrão específico de estados de energia, chamados de estados quânticos, que são discretos e únicos para cada elemento. Quando um elétron é promovido a um nível de energia mais alto, o átomo é considerado excitado. Essa elevação do elétron é temporária. Logo, o elétron retorna ao seu nível de energia mais baixo e o átomo libera a energia adquirida em forma de radiação (Hewitt, 2015). Nesse processo, o átomo passa por uma excitação seguida de relaxação, conforme Figura 23.

Figura 23: Esquema do processo de excitação e relaxação do elétron.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 564).

Quando elétrons "caem" de níveis de energia mais altos para mais baixos, eles emitem fótons. A frequência do fóton está relacionada à diferença de energia entre os níveis. Um fóton pode ser visto como um corpúsculo de pura energia – uma "partícula" de luz – que é ejetado pelo átomo.

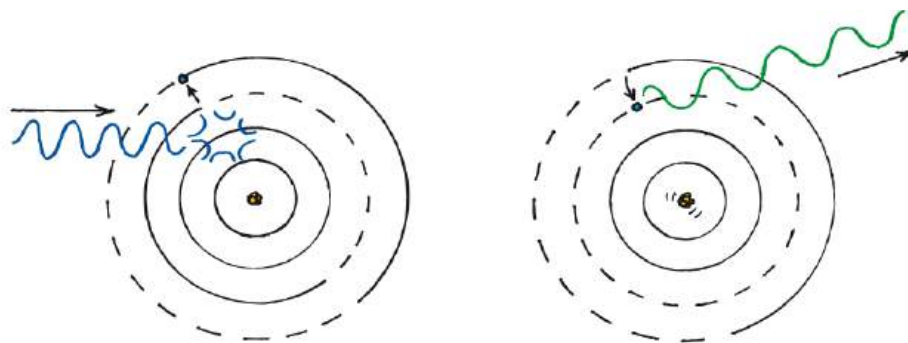
A compreensão dos processos de excitação e relaxação atômica é fundamental para explicar muitos fenômenos em Física, incluindo a fluorescência e a fosforescência. Segundo Hewitt (2015), "o processo de excitação/relaxação pode ser descrito precisamente apenas pela Mecânica Quântica. Ao tentar visualizar o processo em termos da Física Clássica, acabamos chegando a contradições". Isso destaca a necessidade de abordagens quânticas para uma explicação precisa.

Além da agitação térmica e do bombardeio por partículas rápidas, como elétrons, existem outras formas de excitar um átomo. Uma dessas formas é a excitação por calor, onde a energia térmica aumenta a movimentação dos átomos, promovendo elétrons a níveis de energia mais altos. Outra maneira é através da incidência de luz, na qual fótons são absorvidos pelos átomos, fornecendo a energia necessária para que os elétrons sejam excitados para estados de energia superiores.

Conforme a relação (3.7), a luz de alta frequência, como a ultravioleta, transmite mais energia por fóton do que a luz de frequência mais baixa. Algumas substâncias, quando excitadas pela luz ultravioleta, ao relaxarem, emitem luz visível — fenômeno conhecido como **fluorescência**. No entanto, esse processo também pode ocorrer com outros comprimentos de onda, como certos casos de excitação por luz visível. Nesse processo, um fóton incidente excita o átomo, elevando um de

seus elétrons a um estado de energia mais alto. Durante a desexcitação, o átomo pode fazer vários saltos menores, emitindo fótons de energias menores em cada salto. Ou seja, na fluorescência, podemos ter uma radiação invisível ao olho humano (ou não percebida diretamente) incidindo e uma luz dentro da faixa do visível sendo emitida na relaxação.

Figura 24 - Esquemático representando o processo da Fluorescência.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 570).

Certos cristais e grandes moléculas orgânicas, quando excitados, permanecem em estado excitado por um tempo prolongado. Diferente dos materiais fluorescentes, seus elétrons são elevados a órbitas mais altas e ficam aprisionados, resultando em um atraso entre a excitação e a relaxação. Esse fenômeno é conhecido como **fosforescência**. Um exemplo clássico de fosforescência é o fósforo, usado em ponteiros de relógios que brilham no escuro e outros objetos similares. Os átomos ou moléculas desses materiais são excitados pela luz visível, mas ao contrário dos materiais fluorescentes, muitos de seus átomos permanecem em um estado *metaestável* – um estado prolongado de excitação que pode durar várias horas, embora a maioria relaxe mais rapidamente.

Outro processo relacionado à emissão de luz é a **bioluminescência**, que, embora não dependa de excitação por luz ultravioleta ou visível como a fluorescência e a fosforescência, também envolve transições eletrônicas em átomos ou moléculas. Em organismos bioluminescentes, a excitação eletrônica ocorre por meio de reações químicas, resultando na emissão de luz visível. Segundo Viviani e Bechara (2008), a bioluminescência é o processo de emissão de luz visível por organismos vivos como função de comunicação biológica.

Um exemplo de bioluminescência é a Proteína Fluorescente Verde (GFP), descoberta por Osamu Shimomura, em 1962, ao isolar a proteína de águas-vivas. Ele observou que, ao ser irradiada com luz azul, a GFP emitia luz verde. A GFP tornou-se uma ferramenta essencial para marcar e visualizar processos biológicos em células vivas. Em 2008, Shimomura, Martin Chalfie e Roger Tsien foram agraciados com o Prêmio Nobel de Química por suas contribuições na descoberta e desenvolvimento da GFP e suas aplicações em biologia e medicina.

Figura 25 - Visualização de tumor marcado com uma variante vermelha da GFP: uma aplicação biofotônica de proteínas bioluminescentes como GFP e luciferases.



Fonte: Retirado de Viviani e Bechara (2008, p. 26)

O estudo dos fenômenos de emissão de luz, como a fluorescência, fosforescência e bioluminescência, revela a diversidade de interações entre matéria e energia luminosa, sendo explicado pela Física Quântica. Esses fenômenos desempenham papéis fundamentais em várias áreas da ciência, como física e biologia molecular. O desenvolvimento de ferramentas, como o espectroscópio e a utilização de proteínas fluorescentes como a GFP, exemplifica o impacto do conhecimento da luz em avanços científicos e tecnológicos, com aplicações inovadoras na ciência e na medicina.

4 – DESENVOLVIMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Nos capítulos anteriores, foram discutidos os principais desafios e potencialidades do ensino de Física Quântica no nível médio, com ênfase nas dificuldades conceituais e metodológicas enfrentadas tanto por professores quanto por alunos. A partir dessas reflexões, foi desenvolvida uma sequência didática que busca integrar múltiplas abordagens pedagógicas, incluindo a utilização de história e filosofia da ciência, experimentação e metodologias ativas. A proposta tem como objetivo não apenas facilitar a compreensão dos conceitos quânticos, mas também promover a aprendizagem significativa, já referida em capítulos anteriores, de forma diversificada e alinhada às necessidades contemporâneas da educação científica. Além disso, a sequência didática incentiva o desenvolvimento da criticidade dos estudantes, utilizando metodologias que buscam facilitar a identificação de pseudociências, com foco em desconstruir interpretações equivocadas da Física Quântica amplamente difundidas na sociedade.

A proposta da sequência didática tentou ser diversificada para privilegiar os diferentes conhecimentos físicos. São exemplos desses conhecimentos: o formalismo matemático, a observação, a experimentação, a história da ciência, a epistemologia e a tecnologia, reforçando a ideia de que o conhecimento físico é fruto da construção humana. Limitar o ensino a uma única abordagem, como o formalismo conceitual, pode afastar os estudantes, dificultando a compreensão plena dos conteúdos. Ao contrário, o uso de múltiplas perspectivas e metodologias ativas favorece a construção de um conhecimento mais amplo e significativo para os alunos.

O ensino de Física, ou de qualquer outra área do conhecimento, que seja oferecido segundo uma única perspectiva, por exemplo, o formalismo (ou "formulismo"?) conceitual e a solução de problemas, corre o risco de não conseguir estabelecer um diálogo profícuo com boa parte dos alunos. (Pinto e Zanetic, 1999, p. 8).

A maior variedade de atividades teve a finalidade de tornar as aprendizagens o mais significativas possível. Para essa finalidade, é fundamental que o professor tenha clareza sobre o sentido e os objetivos de cada etapa (Zabala, 1998).

O trabalho de mestrado foi desenvolvido a partir da prática docente de sala de aula, sendo que o professor também atuou como pesquisador. Por se configurar como um trabalho pedagógico, os dados foram produzidos a partir de atividades detalhadas na sequência didática, ou seja, as atividades foram os instrumentos de pesquisa disponibilizados para a discussão do processo de aprendizagem⁴. Especificamente, as elencamos a seguir:

1. Questionário de levantamento de ideias prévias;
2. Produção de relatório de atividade prática em grupo;
3. Questionário pós-atividade.

As perguntas dos questionários, bem como as instruções para o relatório, são apresentadas na sequência didática (ver arquivos no Apêndice para maiores detalhes).

A análise aconteceu com base na construção do processo de aprendizagem expresso nos instrumentos apresentados. Buscamos realizar comparações entre as atividades, de modo a categorizar a interpretação dos alunos em relação aos conceitos já mencionados. Essa abordagem não envolveu demonstrar, exclusivamente, se os alunos acertaram ou erraram, mas também evidenciar o processo interpretativo dos mesmos.

A sequência foi aplicada em uma turma da 2ª série do Ensino Médio, no itinerário de Exatas, composta por 41 estudantes. Dentre os participantes, 28 assinaram os termos de consentimento e apenas estes serão considerados para a análise dos dados finais.

A partir da flexibilidade permitida pela nova BNCC, foi criado um itinerário de Exatas intitulado **"Física do Século XX - A Realidade Não é o que Parece"**, centrado em Física Moderna e Contemporânea e que contempla as competências e habilidades exigidas pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Dentro desse itinerário, realizamos a aplicação da sequência didática proposta neste trabalho. Para fins de pesquisa, avaliar e estudar todos os conteúdos abordados no itinerário ao longo do ano todo seria inviável; por isso, foi feito um recorte para focar na sequência didática aqui apresentada.

⁴ Este trabalho teve aprovação do Comitê de Ética da UFSCar.

A seguir, apresentamos algumas competências e habilidades da BNCC que podem, potencialmente, ser trabalhadas no itinerário formativo proposto ou na sequência didática desenvolvida neste trabalho. Relacionar a proposta à BNCC é de grande importância para assegurar o alinhamento com os parâmetros legais.

Quadro 1 – Competências e Habilidades relacionadas com a Sequência Didática

Competências	Habilidades
Competência 1 - Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia, para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e global.	(EM13CNT103) Utilizar o conhecimento sobre as radiações e suas origens para avaliar as potencialidades e os riscos de sua aplicação em equipamentos de uso cotidiano, na saúde, no ambiente, na indústria, na agricultura e na geração de energia elétrica. (EM13CNT104) Avaliar os benefícios e os riscos à saúde e ao ambiente, considerando a composição, a toxicidade e a reatividade de diferentes materiais e produtos, como também o nível de exposição a eles, posicionando-se criticamente e propondo soluções individuais e/ou coletivas para seus usos e descartes responsáveis.
Competência 2 - Analisar e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, e fundamentar e defender decisões éticas e responsáveis.	(EM13CNT201) Analisar e discutir modelos, teorias e leis propostos em diferentes épocas e culturas para comparar distintas explicações sobre o surgimento e a evolução da Vida, da Terra e do Universo com as teorias científicas aceitas atualmente. (EM13CNT203) Avaliar e prever efeitos de intervenções nos ecossistemas, e seus impactos nos seres vivos e no corpo humano, com base nos mecanismos de manutenção da vida, nos ciclos da matéria e nas transformações e transferências de energia, utilizando representações e simulações sobre tais fatores, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como softwares de simulação e de realidade virtual, entre outros).

Competência 3 - investigar situações problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC).	(EM13CNT308) Investigar e analisar o funcionamento de equipamentos elétricos e/ou eletrônicos e sistemas de automação para compreender as tecnologias contemporâneas e avaliar seus impactos sociais, culturais e ambientais.
--	---

Fonte: Brasil. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018.

As competências e habilidades apresentadas são apenas sugestões, pois entendemos que o professor poderá adaptá-las conforme as necessidades de aplicação e as características da turma, garantindo maior flexibilidade no ensino e alinhamento com os objetivos pedagógicos.

4.1 - SEQUÊNCIAS DIDÁTICAS

Antes de apresentar a estrutura do produto desenvolvido, é importante indicar o marco teórico que fundamenta nossa concepção de sequência didática. Optamos por desenvolver uma sequência didática porque, segundo Zabala (1998), ela é um dos elementos diferenciadores das diversas metodologias de ensino, pois a maneira como as atividades são organizadas e articuladas determina a especificidade de cada abordagem pedagógica. A sequência didática pode ser definida como uma série ordenada e inter-relacionada de atividades que formam unidades didáticas, proporcionando uma estrutura clara e progressiva para o processo de ensino-aprendizagem.

Lima (2018) apresenta a importância do uso de sequências didáticas como estratégia eficaz para o ensino de Física Moderna no Ensino Médio, apontando que essa sistematização e abordagem favorece o desenvolvimento gradativo e sistemático do conhecimento, partindo da valorização dos saberes prévios dos

estudantes e promovendo uma participação ativa e reflexiva no processo de ensino-aprendizagem. Segundo o autor, as sequências didáticas permitem organizar as atividades pedagógicas em etapas estruturadas e articuladas, facilitando a compreensão do conteúdo pelos alunos, ao mesmo tempo em que auxiliam os docentes na superação das dificuldades no ensino de determinados tópicos (Lima, 2018).

Segundo Zabala (1998, p. 18), sequências didáticas são: "[...] um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para a realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecidos tanto pelos professores como pelos alunos [...]".

O primeiro elemento que identifica um método é o tipo de ordem em que se propõem as atividades. Os métodos que serão aplicados e a forma como os participantes se relacionam na realização das atividades também são fundamentais para os processos de aprendizagem.

De acordo com Zabala (1998), a sequência didática é essencial para organizar o ensino de forma estruturada, permitindo que as atividades sejam articuladas e ordenadas em uma progressão lógica. Essa organização facilita a aprendizagem dos alunos, pois promove uma relação entre o que eles já sabem e o novo conteúdo a ser aprendido, criando um ambiente propício para uma aprendizagem significativa. Além disso, o autor destaca que as atividades devem ser contextualizadas, de modo que os alunos consigam conectar o conteúdo acadêmico às suas experiências cotidianas, aumentando a relevância e a aplicabilidade dos novos conhecimentos adquiridos (Zabala, 1998).

No processo educativo, Zabala (1998) também enfatiza a importância de distinguir quatro tipos de conteúdos que devem ser trabalhados de maneira integrada para promover uma formação completa dos alunos. O primeiro tipo são os conteúdos factuais, que se referem a fatos, acontecimentos, dados e fenômenos concretos e singulares. São exemplos: a idade de uma pessoa, a localização de um lugar, datas históricas, nomes de autores, códigos e símbolos em diversas áreas do conhecimento. Tradicionalmente, os conteúdos factuais foram a base da educação formal, sendo frequentemente avaliados por meio de provas que exigem a memorização exata das informações. No entanto, Zabala (1998) alerta para o risco de uma aprendizagem mecânica, que não leva à compreensão real dos conceitos associados a esses fatos.

O segundo tipo são os conteúdos conceituais, que abrangem fatos, princípios e teorias que os alunos devem compreender. Esses conteúdos envolvem o "saber", ou seja, a assimilação de informações e ideias fundamentais em diferentes áreas do conhecimento, como a compreensão de leis físicas ou teorias históricas.

Além disso, Zabala (1998) destaca a importância dos conteúdos procedimentais, que se referem ao "saber fazer". Esses conteúdos envolvem métodos, técnicas e procedimentos que os alunos utilizam para resolver problemas ou realizar ações. Exemplos de conteúdos procedimentais incluem a resolução de equações matemáticas, a condução de experimentos ou a aplicação de uma técnica literária em uma redação.

Por fim, os conteúdos atitudinais dizem respeito ao desenvolvimento de atitudes, valores e normas. Eles estão relacionados ao "saber ser", envolvendo o cultivo de posturas éticas e críticas, como a cooperação, o respeito e a responsabilidade social. Trabalhar esses conteúdos de maneira integrada permite que os alunos não apenas aprendam conceitos e técnicas, mas também desenvolvam atitudes que os preparem para uma atuação consciente e ética na sociedade.

Embora possam ser classificados separadamente, Zabala (1998) enfatiza que todos os tipos de conteúdos estão interligados. Um conceito matemático, por exemplo, pode exigir conhecimentos factuais (símbolos e operações), procedimentais (técnicas de cálculo) e atitudinais (persistência e organização para resolver problemas). Assim, a prática educativa deve integrar esses diferentes tipos de conteúdos, garantindo que a aprendizagem ocorra de forma significativa e contextualizada.

Em suma, o ensino deve ser adaptado às características tipológicas dos conteúdos que se pretende abordar. Cada tipologia requer diferentes estratégias pedagógicas e metodológicas, e cabe ao professor equilibrar o trabalho com os três tipos de conteúdo, promovendo uma formação integral dos alunos. As classificações propostas por Zabala (1998) podem ser vistas no quadro abaixo.

Quadro 2 – O ensino segundo as características tipológicas dos conteúdos

Conteúdos referentes a fatos	Conteúdos referentes a conceitos	Conteúdos procedimentais	Conteúdos atitudinais
<i>Apresentação</i> - motivação: sentido	<i>Apresentação</i> - motivação: sentido das	<i>Apresentação</i> - motivação: sentido	<i>Apresentação</i> - motivação

Conteúdos referentes a fatos	Conteúdos referentes a conceitos	Conteúdos procedimentais	Conteúdos atitudinais
das atividades - atitude favorável - conhecimentos prévios - quantidade de informação adequada - apresentação em termos de funcionamento para os alunos <i>Compreensão dos conceitos associados</i> - significância dos conceitos associados <i>Exercitação</i> - estratégias de codificação e assimilação <i>Avaliação</i> - inicial - formativa - somativa	atividades - atitude favorável - conhecimentos prévios - nível de abstração adequado - quantidade de informação adequada - apresentação em termos de funcionamento para os alunos <i>Elaboração</i> - funcionalidade de cada uma das atividades - atividade mental e conflito cognitivo - zona de desenvolvimento proximal - consciência do processo de elaboração <i>Construção</i> - conclusões - generalizações - resumo de ideias importantes - sínteses que integra a nova informação com conhecimentos anteriores - consciência do processo de construção <i>Aplicação</i> - descontextualização <i>Exercitação</i> - estratégias de codificação e retenção <i>Avaliação</i> - inicial - formativa - somativa	das atividades - atitude favorável - competência procedimental prévia - apresentação dos modelos <i>Compreensão</i> - significatividade e funcionalidade - representação global do processo - verbalização - reflexão sobre ações <i>Processos de aplicação e exercitação</i> - regulação do processo de aprendizagem - práticas guiadas e ajudas - aplicação em contextos diferenciados - exercitações suficientes progressivas e ordenadas <i>Avaliação</i> - inicial - formativa - somativa	- atitude favorável - conhecimentos prévios <i>Proposta de modelos</i> <i>Propostas de normas</i> <i>Construção</i> - análise dos fatores positivos e negativos - tomada de posição - implicação afetiva - compromisso explícito <i>Aplicação</i> - conduta coerente <i>Avaliação</i> - inicial - formativa - somativa

Fonte: Zabala, 1998.

Buscamos, ao propor esta sequência didática, contemplar os quatro tipos de conteúdos apresentados por Zabala. Ressaltamos que, em uma escola regular de ensino tradicional, os conteúdos conceituais tendem a ser privilegiados, mas é possível integrá-los com os demais tipos de conteúdos. Para trabalhar os três tipos de conteúdo, podem ser utilizadas estratégias como diálogo, debate, trabalho em pequenos grupos e pesquisa bibliográfica.

Conforme já discutimos anteriormente, de acordo com a concepção construtivista de Zabala (1998), a aprendizagem é um processo de construção ativa do conhecimento pelos alunos, com o professor atuando como mediador, auxiliando-os na interpretação e organização dos novos conteúdos. Nesse sentido, cabe ao professor criar situações de aprendizagem que provoquem conflitos cognitivos e incentivem o desenvolvimento do pensamento crítico e reflexivo dos alunos.

Além disso, a atenção à diversidade é um ponto fundamental para que o ensino construtivista seja eficaz. O autor afirma que as práticas pedagógicas devem reconhecer as diferentes capacidades, ritmos de aprendizagem e experiências pessoais dos alunos. Isso implica em um ensino personalizado e flexível, capaz de oferecer múltiplas oportunidades de aprendizagem e atender às necessidades específicas de cada estudante.

No entanto, ser flexível e personalizado dentro do contexto da escola tradicional é, muitas vezes, um grande desafio. O calendário escolar, geralmente muito apertado, e a necessidade de cobrir todo o conteúdo programático estabelecido podem limitar as possibilidades de adaptação ao ritmo individual dos alunos. Além disso, as reformas no ensino e diminuição da carga horária são desafios sempre presentes. No presente estudo, o produto educacional, em forma de sequência didática, foi aplicado no itinerário formativo de “exatas”, dentro da componente curricular **"Física do Século XX - A realidade não é o que parece"**, o que possibilitou maior flexibilidade tanto no tratamento dos conteúdos quanto nas formas das atividades, oferecendo assim um espaço mais adaptado às características dos alunos e às necessidades específicas do processo de ensino-aprendizagem.

Uma das estratégias adotadas no início da sequência didática foi a realização de uma atividade prévia para despertar o interesse dos alunos, conhecida como “atitude favorável”. Para atuar nessa variável, utilizamos diferentes recursos para promover a autoestima e o autoconceito dos estudantes, fatores essenciais para uma aprendizagem bem-sucedida. Ao diversificar as metodologias, buscamos engajar um número maior de alunos, entendendo que nem todos aprendem da mesma forma, no mesmo tempo ou com o mesmo trabalho.

Em síntese, ao desenvolver esta sequência didática, buscamos aplicar os conceitos fundamentais de Zabala (1998) para proporcionar uma experiência de

ensino que contemple as diferentes tipologias de conteúdo — conceituais, procedimentais e atitudinais. A organização cuidadosa das atividades, alinhada a uma abordagem flexível e contextualizada, visa não apenas garantir a assimilação dos conteúdos, mas também engajar os alunos de forma ativa no processo de aprendizagem. Além disso, a proposta busca promover o pensamento crítico, capacitando os alunos a questionar e identificar interpretações pseudocientíficas, especialmente aquelas relacionadas à Física Quântica. Assim, acreditamos que essa proposta possa contribuir para superar alguns dos desafios enfrentados no ensino tradicional, oferecendo uma alternativa pedagógica mais integrada e significativa para outros educadores.

4.2 - PRODUTO DESENVOLVIDO: SEQUÊNCIA DIDÁTICA “FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: O UNIVERSO ALÉM DO VISÍVEL”

Com base no exposto, foi desenvolvida uma sequência didática - inicialmente com nove aulas e finalizando em dez aulas, focando na compreensão conceitual da Física Quântica (FQ), experimentos que deram suporte aos conceitos e aplicações bem-sucedidas da FQ. Além disso, foram consideradas as aplicações e exemplos de sucesso da FQ para fornecer credibilidade à teoria. A capa do Produto Educacional pode ser vista na figura abaixo.

Figura 26 - Capa do Produto Educacional



Fonte: Autor.

Para introduzir os estudantes aos fundamentos da FQ, iniciamos com uma investigação sobre a natureza da luz, seguida por discussões sobre ciência moderna, métodos científicos e a distinção entre ciência e pseudociência, oferecendo um contexto mais amplo e crítico para o estudo dos conceitos quânticos.

Essa escolha metodológica também dialoga com a proposta de Gil e Solbes (1993), que defendem ser essencial explorar os limites da Física Clássica para motivar e justificar a transição para os conceitos da Física Moderna. Segundo os autores, ao evidenciar os pontos em que a física clássica falha — como no caso da radiação do corpo negro ou do efeito fotoelétrico —, os estudantes compreendem de forma mais significativa a necessidade do surgimento de novos paradigmas, como a relatividade e a mecânica quântica.

De acordo com Hoernig, Massoni e Hadjimichef (2021, p. 17), há falta de consenso sobre quais tópicos de Física Quântica devem ser abordados, em que ordem e de que maneira. No entanto, em seu estudo, os autores destacaram a difração e interferência como tópicos de importância incontestável e sugeriram a descoerência quântica como abordagem para tratar do misticismo quântico. Em outro estudo citado pelos autores, os tópicos fundamentais incluíram a dualidade, funções de onda e átomos. Para a escolha dos tópicos de Física Quântica que compõem a construção da sequência didática, utilizamos como referência o estudo *Delphi* apresentado por Hoernig, Massoni e Hadjimichef (2021, p. 11), realizado com 48 professores. Como ponto de partida, optamos por uma investigação sobre a natureza dual da luz.

A sequência didática terá como eixo central a pergunta "O que é a luz?", abordando eventos históricos sobre a natureza da luz, culminando na compreensão da dualidade onda-partícula. O efeito fotoelétrico será utilizado para explorar a natureza corpuscular da luz, enquanto a difração, por meio da construção de um espectrógrafo, abordará a natureza ondulatória. Além disso, conceitos históricos importantes no desenvolvimento da FQ serão apresentados, como o problema do corpo negro e a Lei de Wien, marcos do início dessa área.

O conceito de salto quântico será abordado experimentalmente por meio da fluorescência, em conjunto com o modelo atômico de Bohr. Também discutiremos o misticismo quântico e as pseudociências quânticas. Em seguida, apresentaremos o comprimento de onda de De Broglie, utilizando um problema algébrico para delimitar as fronteiras entre a Física Clássica e a Física Quântica.

Para organizar de forma clara e objetiva as atividades da sequência didática, optou-se por apresentá-las em tabelas resumidas. Essa estrutura visa facilitar tanto a compreensão do planejamento quanto a execução das atividades propostas em sala de aula.

Nos parágrafos seguintes, apresenta-se a sequência didática com uma breve descrição das atividades sugeridas. Vale enfatizar que a proposta não deve ser compreendida como um guia estático, mas sim como uma referência flexível, passível de adaptações conforme as realidades específicas, os contextos escolares e as escolhas pedagógicas de cada docente.

[Aula #1] Apresentação da SQ e levantamento de conhecimentos prévios	
Resumo	Apresentação da proposta do trabalho e do tema geral. Levantamento dos conhecimentos prévios através da aplicação de um formulário de perguntas.
Conteúdos	Conceitual: Visão geral da física quântica e aplicações de sucesso.
	Procedimental: responder o formulário inicial para levantamento de conhecimentos prévios.
	Atitudinal: Reflexões quanto à utilização da física quântica e presença no cotidiano
Estratégias	Introdução expositiva utilizando slides; Diálogo com os estudantes; Aplicação de formulário online.

A aula #1 tem como objetivo apresentar a proposta da sequência didática e fornecer uma visão geral da FQ e suas aplicações. Além disso, será feito o levantamento dos conhecimentos prévios dos alunos, utilizando um formulário de perguntas para mapear o que já conhecem sobre o tema. A aula se inicia com uma exposição introdutória utilizando slides, seguida de um diálogo interativo com os estudantes para promover reflexões sobre a presença da FQ no cotidiano. A estratégia de aplicação de um formulário *online* serve para registrar as percepções iniciais dos alunos, permitindo uma abordagem mais personalizada nas aulas subsequentes e servindo como levantamento de dados. As questões aplicadas estão disponíveis no APÊNDICE – Questionário Inicial. O tempo estimado para responder ao questionário foi de 30 minutos.

[Aula #2] Introdução - “O que é a luz?”	
Resumo	Introdução sobre o tema da natureza da luz. Breve discussão sobre as cores dos objetos e sua relação com a luz. Respostas da Física clássica sobre a natureza da

	luz. Pinturas e Pontilhismo;
Conteúdos	Conceitual: Teoria das Cores de Newton; Reflexão da luz; Natureza da luz;
	Procedimental: Produção dos desenhos (contínuo e pontilhado);
	Atitudinal: Trabalho em pares;
Estratégias	Introdução expositiva utilizando slides; Produção dos desenhos pelos alunos.

A aula #2 tem como objetivo introduzir o tema da natureza da luz, com uma discussão inicial sobre as cores dos objetos e sua relação com a luz. A abordagem inclui a explicação da teoria das cores de Newton e como a reflexão da luz define as cores que percebemos. Além disso, os alunos participam de uma atividade prática de produção de desenhos utilizando as técnicas de traço contínuo e pontilhismo. A aula incentiva o trabalho colaborativo, organizando os estudantes em pares, enquanto estratégias expositivas com slides fornecem a base teórica necessária.

[Aula #3] Experimento #1 – Luz, cores e fluorescência	
Resumo	Atividade lúdica com desenhos e tintas tipo 'neon'. Os alunos devem colocar os desenhos produzidos sob diferentes fontes de luz e observar as diferenças. Utilizando tinta neon devem desenhar e ver se existe alguma diferença em relação às tintas utilizadas no desenho;
Conteúdos	Conceitual: Teoria das Cores de Newton; Reflexão da luz; Fluorescência; ultravioleta;
	Procedimental: observar e registrar os desenhos sob diferentes fontes de luz
	Atitudinal: Trabalho em pares;
Estratégias	Experimento com diferentes fontes de luz sendo aplicadas sobre os desenhos dos alunos.

A aula #3 consiste em um experimento prático e lúdico envolvendo luz, cores e fluorescência, utilizando os desenhos previamente produzidos na aula #2. Os alunos irão expor seus desenhos sob diferentes fontes de luz, como luz natural, luz ultravioleta (UV) e luz RGB, observando as mudanças causadas. Além disso, utilizando tintas neon, pode-se observar a interação com as fontes UV. O objetivo é aprofundar a compreensão sobre a Teoria das Cores de Newton, a reflexão da luz e o fenômeno da fluorescência. Trabalhando em pares, os alunos irão registrar as diferenças observadas nos desenhos sob cada tipo de luz e discutir como as

diferentes fontes influenciam as cores percebidas, promovendo o aprendizado por meio da experimentação colaborativa.

Após a atividade experimental, realizada em grupos, os alunos deveriam produzir um relatório. O roteiro da atividade e os detalhes do relatório estão no APÊNDICE – Roteiro Experimental da Atividade Desenhos e Cores, que envolve diferentes fontes de luz.

[Aula #4] Discussão sobre as observações do experimento #1	
Resumo	Após o registro dos desenhos na aula anterior, os alunos devem compartilhar as experiências e observações com o grupo. Uma discussão sobre salto quântico e quantização da energia será realizada pelo professor;
Conteúdos	Conceitual: Fluorescência; Salto quântico; Estrutura atômica; modelo de Niels Bohr; Corpo Negro; Quantização da energia; Níveis de energia;
	Procedimental: pesquisar sobre salto quântico, fluorescência e materiais fluorescentes;
	Atitudinal: Trabalho em pares;
Estratégias	Discussão em grupo sobre os resultados; Aula expositiva.

A aula #4 é dedicada à discussão dos resultados do experimento realizado na aula anterior. Os alunos compartilham suas observações sobre o comportamento dos desenhos sob diferentes fontes de luz e discutem, em grupo, as experiências registradas. A partir dessas observações, o professor conduz uma explicação sobre os conceitos de salto quântico, quantização da energia e a estrutura atômica, abordando o modelo de Niels Bohr. A aula promove o aprendizado colaborativo e investigativo, incentivando os alunos a pesquisar mais sobre fluorescência e materiais fluorescentes.

Na Aula #4, os alunos deveriam responder, individualmente, ao questionário disponível no APÊNDICE – Questionário Pós-Atividade Desenhos e Cores. O tempo estimado para responder ao questionário foi de 20 minutos.

[Aula #5] Discussão sobre “Salto quântico” e pseudociência.	
Resumo	Definição de Pseudociência. Ciência x Pseudociência: como identificar? Pesquisa sobre pseudociência e salto quântico;
Conteúdos	Conceitual: pseudociência;
	Procedimental: pesquisar sobre “salto quântico” e identificar pseudociências;

	Atitudinal: Trabalho em pares;
Estratégias	Pesquisa pelos alunos sobre pseudociência e aplicação da atividade para identificação de pseudociências; Construção de um portfólio coletivo; Discussão sobre os resultados encontrados.

A aula #5 é centrada na discussão sobre pseudociência e como diferenciá-la da ciência, com um foco especial no uso equivocado de termos como "salto quântico" em contextos pseudocientíficos. A aula começa com a definição de pseudociência e uma análise de exemplos para que os alunos compreendam como identificar alegações pseudocientíficas. Em seguida, os alunos realizam pesquisas sobre pseudociências que utilizam conceitos quânticos de maneira distorcida. O trabalho em pares culmina na construção de um portfólio coletivo, onde os alunos registram suas descobertas, promovendo a reflexão crítica sobre o uso correto dos conceitos científicos.

[Aula #6] Experimento #2 - espectrógrafo	
Resumo	Construção de um espectrógrafo para celular e observação e registro de diferentes espectros;
Conteúdos	Conceitual: espectro de luz;
	Procedimental: construção do espectrógrafo e observação de espectros;
	Atitudinal: Trabalho em pares;
Estratégias	Construção de um espectrógrafo caseiro para celular pelos alunos; Registro dos espectros.

A aula #6 envolve a construção de um espectrógrafo caseiro, permitindo que os alunos observem e registrem diferentes espectros de luz. O objetivo conceitual é introduzir e explorar o conceito de espectro de luz, enquanto, no plano procedimental, os alunos colocam a teoria em prática ao construir e utilizar o espectrógrafo para celulares. Trabalhando em pares, os estudantes são incentivados a observar diferentes fontes de luz e registrar seus respectivos espectros, promovendo tanto a aprendizagem prática quanto o trabalho colaborativo.

Após a atividade experimental #6, realizada em grupos, os alunos deveriam produzir um relatório. O roteiro da atividade e os detalhes do relatório podem ser vistos no APÊNDICE – Roteiro da Construção do Espectrógrafo.

[Aula #7] Discussão das observações - Espectros	
Resumo	Discussão sobre os resultados dos espectros observados – diferenças e

	semelhanças. Explicação sobre as técnicas que utilizam espectros para, por exemplo, identificar elementos químicos. Átomo de hidrogênio, tabela periódica e o caso do Sol (presença de H e He é pela quântica);
Conteúdos	Conceitual: espectro da luz; linhas espectrais, Limite de Planck e cálculo do comprimento de De Broglie;
	Procedimental: discussão em grupo sobre observações;
	Atitudinal: Trabalho em pares
Estratégias	Discussão em grupo; Aula expositiva

A aula #7 é dedicada à discussão dos resultados obtidos com o experimento dos espectros, focando nas diferenças e semelhanças observadas. A discussão explora como os espectros podem ser utilizados para identificar elementos químicos, exemplificando com o caso do átomo de hidrogênio e a tabela periódica, bem como a identificação de elementos como Hélio e Hidrogênio no Sol. Além disso, são apresentados conceitos como linhas espectrais, o limite de Planck e o cálculo do comprimento de onda de De Broglie. Os alunos discutem em grupo suas observações, promovendo a compreensão dos fenômenos observados e sua relação com a física quântica.

Na Aula #7, os alunos deveriam responder, individualmente, ao questionário disponível no APÊNDICE – Questionário Pós-Atividade do Espectrógrafo. O tempo estimado para responder ao questionário foi de 20 minutos.

[Aula #8] Limites de aplicação da quântica e comprimento de onda de Broglie	
Resumo	Discussão sobre os limites de aplicação da Teoria quântica; Limite de Planck; cálculo do comprimento de De Broglie;
Conteúdos	Conceitual: Limite de Planck e cálculo do comprimento de De Broglie;
	Procedimental: cálculo do comprimento de onda de De Broglie;
	Atitudinal: Trabalho em pares;
Estratégias	Aula expositiva e atividade para os alunos.

A aula #8 discute os limites de aplicação da Teoria Quântica, com foco no Limite de Planck e no cálculo do comprimento de onda de De Broglie. Os alunos irão explorar como essas noções definem a transição entre o comportamento clássico e quântico das partículas, permitindo uma compreensão mais profunda das limitações e da aplicabilidade da FQ em diferentes contextos. A aula combina explicações teóricas e atividades práticas, nas quais os alunos trabalham em pares para calcular

o comprimento de onda de De Broglie de diferentes partículas, promovendo a aprendizagem ativa e colaborativa.

[Aula #9]	Fechamento da Sequência
Resumo	Discussão sobre a ciência moderna para encerramento e aplicação do questionário de verificação;
Conteúdos	Conceitual: método científico;
	Procedimental: reflexão sobre os métodos científicos e resposta do questionário;
Estratégias	Aula expositiva e atividade para os alunos.

Na aula #9, o objetivo é realizar o encerramento da sequência didática com uma discussão sobre os métodos científicos e a ciência moderna. Os alunos serão convidados a refletir sobre as principais abordagens da FQ e sua conexão com o método científico, promovendo uma visão crítica do processo de investigação científica. Além disso, será aplicado um questionário de verificação, com o intuito de avaliar o progresso dos alunos ao longo da sequência e consolidar os conceitos discutidos.

Ao final da aula, os alunos deverão responder, individualmente, ao questionário disponível no APÊNDICE – Questionário Final. O tempo estimado para responder ao questionário é de 30 minutos.

Assim, a sequência didática desenvolvida visa proporcionar uma abordagem diversificada e dinâmica para o ensino de FQ no Ensino Médio, integrando teoria, experimentação e discussão crítica sobre ciência e pseudociência. Ao final do processo, espera-se que os alunos não apenas compreendam os conceitos centrais da FQ, mas também adquiram ferramentas para diferenciar ciência de pseudociência, contribuindo para uma formação científica mais sólida e consciente.

Como veremos no capítulo a seguir, sobre a descrição da aplicação da sequência didática, alguns conceitos fundamentais descritos anteriormente no capítulo de física e nas justificativas, como o efeito fotoelétrico, surgiram como uma necessidade ao longo da aplicação e foram incorporados ao produto educacional, embora não estivessem previstos na sequência inicial apresentada aqui.

5 – DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO DO PRODUTO

O projeto foi aplicado em um colégio particular localizado na cidade de Campinas, no interior do estado de São Paulo, em uma turma do itinerário formativo de “exatas”, no componente curricular intitulado “*Física do Século XX: a realidade não é o que parece*”. O referido componente do itinerário de exatas era opcional para alunos da segunda série do Ensino Médio e contava com 41 participantes, dos quais 28 assinaram os termos do comitê de ética concordando em participar da coleta de dados para o mestrado.

Inicialmente, apresentou-se à turma a proposta da sequência didática e os objetivos do projeto de mestrado, dando uma visão geral aos estudantes. É importante destacar que algumas das atividades realizadas na sequência didática já haviam sido aplicadas pelo professor-pesquisador em outros contextos escolares e integram seu repertório didático. Um esboço da sequência didática foi aplicado a uma turma-teste no ano anterior, em 2023. Durante essas primeiras aplicações, algumas dificuldades foram encontradas, como a necessidade de mais tempo para a compreensão de conceitos abstratos e ajustes nos experimentos práticos, o que permitiu aprimorar o planejamento e execução com a nova turma.

A seguir, será feita uma descrição detalhada, aula a aula, da aplicação do projeto.

Aula #1:

Na primeira aula, foi feita a apresentação da sequência didática e realizado o levantamento dos conhecimentos prévios por meio do preenchimento do questionário inicial (disponível no Apêndice). Também, nesta aula introdutória, foi feita uma breve conversa sobre os conhecimentos dos alunos acerca da FQ. Foi perguntado se já haviam estudado ou ouvido falar sobre o tema. O formulário foi preenchido pelos estudantes de forma online, utilizando seus celulares por meio da plataforma *Microsoft Forms*. O tempo para preenchimento do questionário foi de 30 minutos e consideramos suficiente para respostas completas.

Aula #2:

Na segunda aula, o tema central foi uma introdução à natureza da luz, iniciando com a pergunta: "O que é a luz?". A aula começou com uma breve discussão sobre a teoria das cores dos objetos e sua relação com as fontes de luz, seguida de uma explanação sobre as respostas oferecidas pela Física Clássica a essa questão. Também foi apresentado o sistema RGB de cores e o funcionamento do olho humano.

Além disso, os estudantes foram introduzidos à técnica de pontilhismo na pintura, utilizada futuramente como analogia para a granularidade da matéria (e da energia) na FQ. A ideia foi mostrar que é possível criar um desenho utilizando apenas pontos, em vez de traços contínuos, representando de forma inicial o conceito de granularidade, que será mais explorado futuramente.

Ainda nesta aula, utilizamos uma exposição teórica com slides para introduzir os conceitos e, como atividade prática, os alunos foram convidados a produzir dois desenhos: um com traços contínuos e outro utilizando a técnica do pontilhismo.

Na figura 27 temos um exemplo de pontilhismo apresentado aos estudantes. Os temas motivadores para essa atividade foram a representação da matéria e da realidade, conceitos trabalhados ao longo do ano no itinerário.

Figura 27 - Quadro "Tarde de Domingo na Ilha de Grande Jatte" (1884 – 1886) apresentado aos estudantes como exemplo de pontilhismo.



Fonte: Disponível em:

<https://abra.com.br/artigos/tarde-de-domingo-na-ilha-de-grand-jatte-analise-da-obra/> Acesso em: 9 jul. 2024.

Para motivar a criação dos desenhos, foi apresentada uma situação-problema: os alunos seriam artistas e precisariam representar, em dois desenhos, suas respostas para as perguntas "O que é a matéria?" e "O que é a realidade?". Essa proposta tinha o objetivo de engajar também os alunos que não se identificam diretamente com as ciências exatas, oferecendo uma abordagem mais artística e interpretativa. No início, alguns alunos consideraram difícil a representação abstrata, mas logo começaram suas produções com criatividade e empenho.

Antes da produção dos desenhos, de forma sintética apresentamos o pontilhismo como uma técnica de pintura que surgiu na década de 1880, principalmente associada aos artistas Georges Seurat e Paul Signac, ambos pintores franceses. Essa técnica envolve a aplicação de pequenos pontos de cor pura sobre a tela, que, quando vistos de longe, se misturam na retina do observador, criando uma imagem com cores vibrantes e luminosas. O pontilhismo é uma forma de impressionismo e é considerado um dos marcos importantes na história da arte moderna. Curiosamente, esse período histórico coincide com o surgimento da FQ, quando cientistas começaram a questionar a natureza contínua da energia e da matéria. Ao apresentar essa técnica, buscamos estabelecer uma conexão entre a arte e os conceitos de granularidade presentes na FQ.

Após a apresentação e definição do pontilhismo, realizamos uma pequena atividade com os alunos, na qual foram apresentados cinco desenhos. Apresentamos aos estudantes as pinturas que podem ser vistas na figura 28 e perguntamos a eles quais desses desenhos foram feitos com a técnica de pontilhismo e quais não foram.

A atividade foi bastante rica e interessante, pois gerou engajamento. Vários alunos se manifestaram tentando acertar a pergunta. Ao perguntar como poderíamos descobrir quais dos desenhos apresentados foram feitos com pontilhismo, alguns alunos responderam que seria necessário dar um zoom, ou seja, aproximar bastante a imagem. Essa analogia foi muito interessante, pois eles concluíram que, para descobrir a granularidade do desenho, era necessário olhar de perto, algo bastante útil ao pensamento da quântica.

Figura 28 - Imagem utilizada durante a atividade sobre pontilhismo.



Fonte: Autoral

Sobre as obras selecionadas apresentamos os títulos, autores e breve síntese:

- "Um canto do meu ateliê" (1884) de Abigail de Andrade, uma pintora brasileira. Abigail de Andrade foi uma das primeiras mulheres a ganhar reconhecimento no campo das artes plásticas no Brasil, e esta pintura é um exemplo de seu trabalho, retratando o interior de um ateliê de maneira detalhada e evocativa.
- "O Circo" ("Le Cirque"), criada por Georges Seurat em 1890. Seurat foi um artista francês e um dos principais expoentes do pontilhismo. A obra utiliza pequenos pontos de cor para criar uma cena vibrante de circo, destacando acrobatas, palhaços e a plateia. Esta técnica cria um efeito óptico único, característico do estilo de Seurat.
- "Estrada do Mundo Novo com Pão de Açúcar ao Fundo" (1888) também é de Abigail de Andrade. A pintura retrata uma cena do Rio de Janeiro, com a famosa montanha do Pão de Açúcar ao fundo.
- "A Passagem do Gado" é uma pintura a óleo sobre tela de 1867, criada pelo artista português João Cristino da Silva. A obra retrata uma cena rural com um campino conduzindo gado por uma paisagem dramática e grandiosa.
- "Retrato de Félix Fénéon" é uma pintura a óleo sobre tela realizada pelo artista francês Paul Signac em 1890. A obra, no estilo pontilhista, retrata Félix Fénéon, um negociante de arte, crítico de arte e anarquista, que era amigo de Signac. Este retrato destaca-se por sua técnica detalhada e pela representação de Fénéon, um importante ativista político da época, refletindo tanto a habilidade artística de Signac quanto a personalidade vibrante de seu amigo.

Conforme mencionado, após a atividade de reconhecimento do movimento pontilhista e a discussão sobre suas técnicas e analogias com a granularidade na Física Quântica, os alunos iniciaram a elaboração dos seus próprios desenhos. No entanto, o tempo disponível em sala de aula não foi suficiente para a conclusão completa das obras, o que fez com que os estudantes levassem os desenhos para finalizar em casa.

Aula #3:

Na aula 3, realizamos o primeiro experimento, chamado 'Luz, Cores e Fluorescência'. Foi feita uma introdução teórica rápida sobre propagação da luz, feita uma demonstração de propagação retilínea utilizando um laser verde e um borrifador de água - apresentado na figura 29 a seguir.

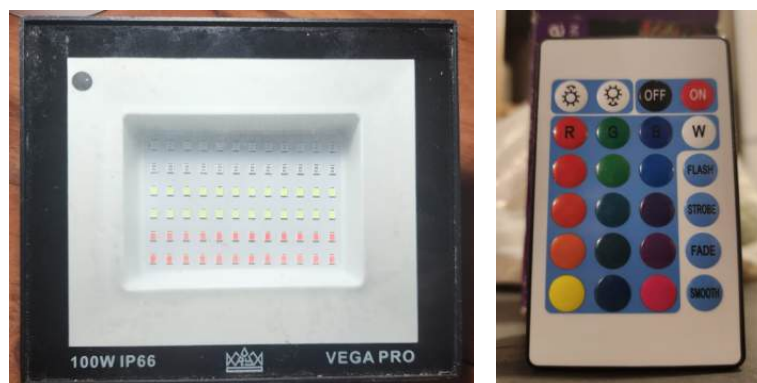
Figura 29 - Demonstração utilizando laser verde e borrifador de água.



Fonte: Autor.

Na atividade lúdica com os desenhos produzidos e com tintas do tipo neon, os alunos colocaram os desenhos produzidos sob diferentes fontes de luz - luz branca, RGB e UV - e observaram as diferenças. Para realizar essa atividade fomos para uma sala escura e utilizamos duas fontes de luz diferentes: um refletor RGB com controle remoto e uma fonte de Luz Ultravioleta, que podem ser vistos nas figuras 30 e 31 abaixo.

Figura 30 - Refletor RGB e controle remoto utilizados na atividade experimental.



Fonte: Autor.

A fonte de luz UV utilizada foi um secador de unha, conhecido como “cabine”, de baixo custo. É uma fonte de luz de 6W de potência que utiliza LED e emite luz UV e azul/violeta.

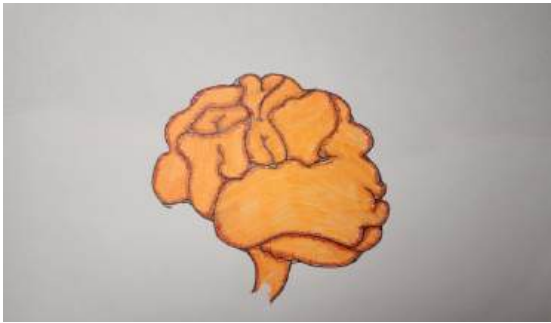
Figura 31 - Fonte de luz UV utilizada na atividade experimental.



Fonte: Autor.

Como exemplo da atividade apresentamos na figura 32 um desenho produzido por um dos estudantes e observado sob diferentes fontes de luz (luz branca, luz verde, luz vermelha e luz azul).

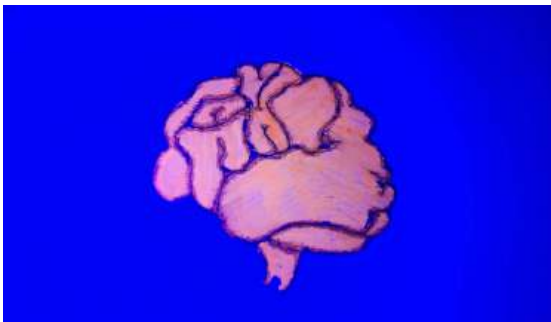
Figura 32 - Exemplos de desenhos.



(a) Fonte de luz branca



(b) Fonte de luz verde



(c) Fonte de luz azul



(d) Fonte de luz vermelha

Fonte: Autor.

Utilizamos, também, tintas neon para maquiagem (figura 33), que foram disponibilizadas aos estudantes para que pudessem pintar os corpos ou os desenhos e verificar se existe alguma relação entre as tintas neon e a teoria das cores clássica vista anteriormente. Foram disponibilizadas aos estudantes alguns pequenos frascos com tintas neon para maquiagem, conforme figura 33 a seguir.

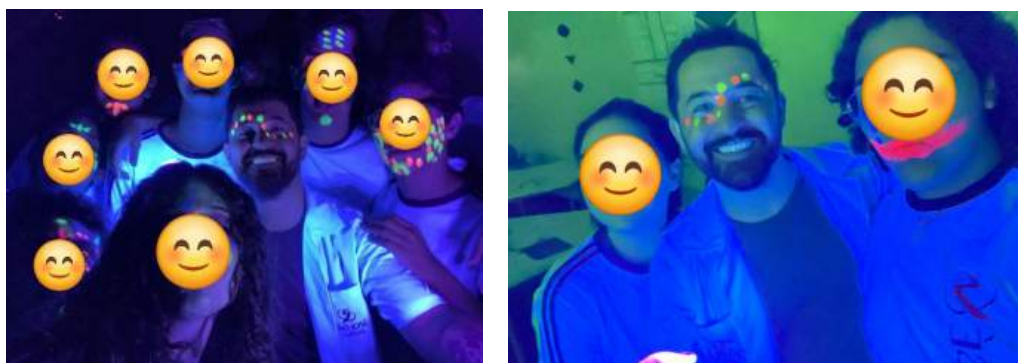
Figura 33 - Tintas Neon para maquiagem e foto do efeito observado na luz neon.



Fonte: Autor

Essa parte do projeto, particularmente, foi muito divertida e engajou bastante os estudantes, gerando muitas fotos e diversão. Algumas fotos do dia da aplicação podem ser vistas abaixo.

Figura 34 - Fotos da aplicação da atividade com tintas neon.



Fonte: Autor

Na parte conceitual, abordamos as teorias das cores, a reflexão da luz, a fluorescência e o espectro eletromagnético. No procedimento, os alunos fizeram observação e registro dos desenhos sob diferentes fontes de luz, incluindo, no mínimo, luz branca, RGB e ultravioleta.

Após a atividade experimental, os alunos, em grupos, produziram um relatório. O roteiro da atividade e os detalhes do relatório estão nos Apêndices, incluindo o roteiro experimental da atividade, os desenhos e as cores, envolvendo diferentes fontes de luz.

Aula #4:

Na aula número 4, após o registro dos desenhos sob diferentes fontes de luz realizados na aula anterior, os alunos compartilharam suas experiências e observações com os demais grupos. Após esse momento inicial de reflexão sobre a atividade, foram apresentadas duas imagens com emissão de luz (figura 35) e foram feitos alguns questionamentos: O que o ferro em brasa e o vagalume têm em comum? Será que o fenômeno que faz o ferro em brasa e o vagalume emitirem luz são os mesmos? Existe alguma semelhança com o experimento da aula passada?

Figura 35 - Imagens apresentadas aos estudantes: ferro incandescente e vagalume.

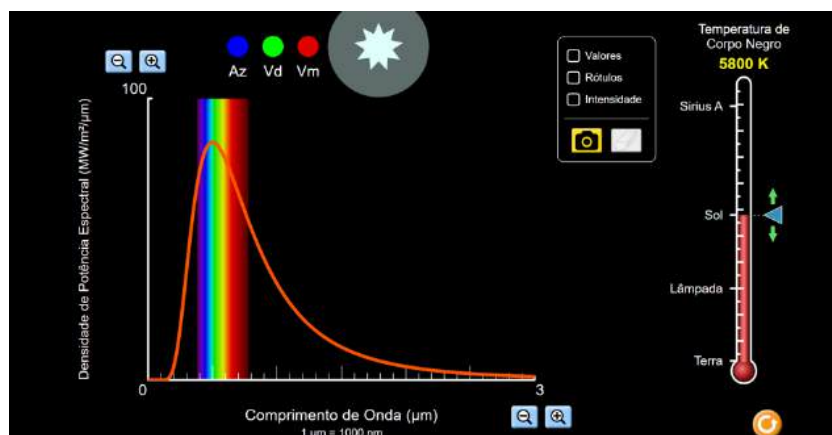


Fonte: Disponível em: <https://depositphotos.com/br/photos/ferro-incandescente.html>. Acesso em 21 out. 2024.

Foi realizada uma discussão sobre a teoria das cores e fluorescência, destacando a necessidade de um modelo mais moderno para explicar todos os fenômenos observados na aula experimental e nas figuras apresentadas. Foram apresentados os fenômenos da luminescência e incandescência, além das diferenças entre fluorescência, fosforescência e bioluminescência. Durante esse processo, surgiu a necessidade de entendermos o que é o salto quântico.

Após esse momento, fizemos o que chamamos de pausa histórica, contextualizando os estudantes em torno do ano de 1900, iniciando com artigo de Planck como marco do nascimento da FQ e o problema chamado de Catástrofe do Ultravioleta. Foram apresentados os conceitos de radiação de corpo negro e emissão luminosa utilizando o simulador PHET - figura abaixo.

Figura 36 - Simulador sobre espectro de Corpo Negro utilizando durante a aula.



Fonte: Autor (disponível em: https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_all.html?locale=pt_BR).

Também foi apresentada a Lei de Wien de 1893, produzida pelo alemão Wilhelm Wien, junto com um caso de aplicação para a Lei de Wien com o cálculo da temperatura do Sol. O modelo da quantização de Planck foi apresentado, com seu cálculo para a energia quantizada e a Teoria dos Quanta. Além disso, foi apresentado o modelo de Ernest Rutherford para o átomo, integrando a descoberta do núcleo atômico e os modelos quânticos para radiações eletromagnéticas. O átomo de Bohr e as transições eletrônicas também foram discutidos, e, por fim, chegamos ao cerne da aula: os saltos quânticos, ou as chamadas transições eletrônicas propostas por Bohr. Após esse bloco conceitual foi apresentado o vídeo “A Escala do Universo Quântico | O que é quantização?”, do canal Universo Narrado, disponível em: [A Escala do Universo Quântico | O que é quantização?](https://youtu.be/xdqIKIJ1-E?si=OF0c1cB510-lhgv5) (<https://youtu.be/xdqIKIJ1-E?si=OF0c1cB510-lhgv5>).

Os alunos também responderam, individualmente, a um questionário (disponível no apêndice) intitulado 'Questionário Pós-Atividade dos Desenhos e Cores'. O tempo utilizado para responder ao questionário foi de cerca de 20 minutos.

Aula #5:

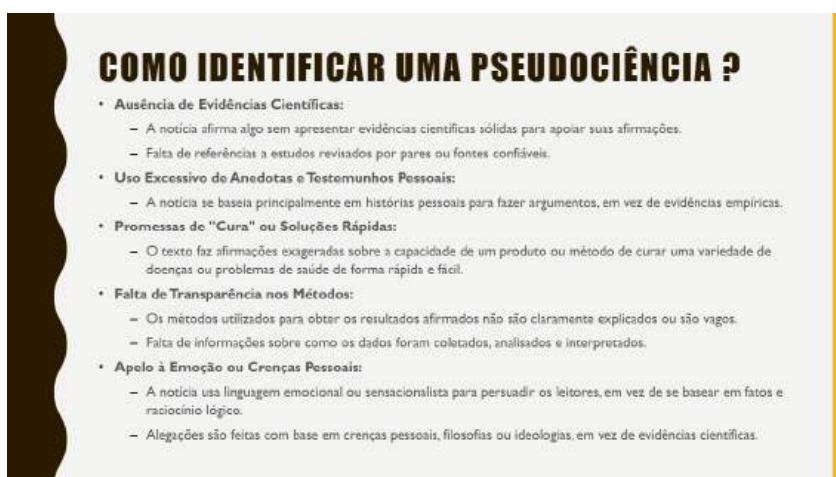
Na aula número 5 demos sequência à atividade iniciada na aula 4 sobre salto quântico, discutimos como identificar a pseudociência através de exemplos práticos. Foi pedido que os estudantes que pesquisarassem em seus celulares o termo “salto quântico”.

Como o algoritmo de busca leva em conta o perfil do usuário (celular), quando os estudantes pesquisaram sobre salto quântico na internet, cada um encontrou resultados diferentes, o que gerou bastante discussão e curiosidade.

Para alguns, o termo salto quântico veio carregado de *sites* que prometiam “curas emocionais”, outros receberam receitas de “sucesso financeiro” e poucos eram os *sites* “científicos”.

Trabalhando em pares, os alunos realizaram uma pesquisa sobre a pseudociência envolvendo o salto quântico. A imagem abaixo foi apresentada como um resumo para tentar identificar uma pseudociência ao lerem uma notícia ou site.

Figura 37 - Resumo das estratégias para tentar identificar um texto pseudocientífico.



Fonte: Autor.

É importante ressaltar que não existe um método único e infalível para identificar um discurso pseudocientífico. Existem estratégias que podem auxiliar nessa identificação, como as apresentadas na Figura 37, mas elas podem falhar em certos contextos. Muitos conteúdos científicos, sobretudo aqueles voltados à divulgação para o público geral ou presentes em materiais didáticos escolares, também são frequentemente apresentados de forma simplificada, sem explicitação de evidências ou métodos científicos. Por outro lado, as pseudociências tendem a falhar simultaneamente em vários aspectos fundamentais da prática científica, como ausência sistemática de evidências, falta de transparência metodológica, uso de linguagem sensacionalista e apelo a crenças pessoais — o que pode ser um indicativo mais robusto para sua identificação.

Figura 38 - Exemplos de *sites* encontrados ao pesquisarmos “salto quântico” na ferramenta de busca *Google*.



Fonte: Autor.

Durante a discussão, uma aluna compartilhou um testemunho pessoal: ela encontrou sua avó preparando um remédio caseiro com base em um vídeo que prometia curas milagrosas por meio de um “remédio quântico”. Felizmente, após ter contato com o conteúdo das aulas, a aluna conseguiu alertar sua avó, que decidiu não consumir o remédio. Esse relato evidencia a importância de debates como esse em sala de aula, destacando o papel da educação científica na vida cotidiana.

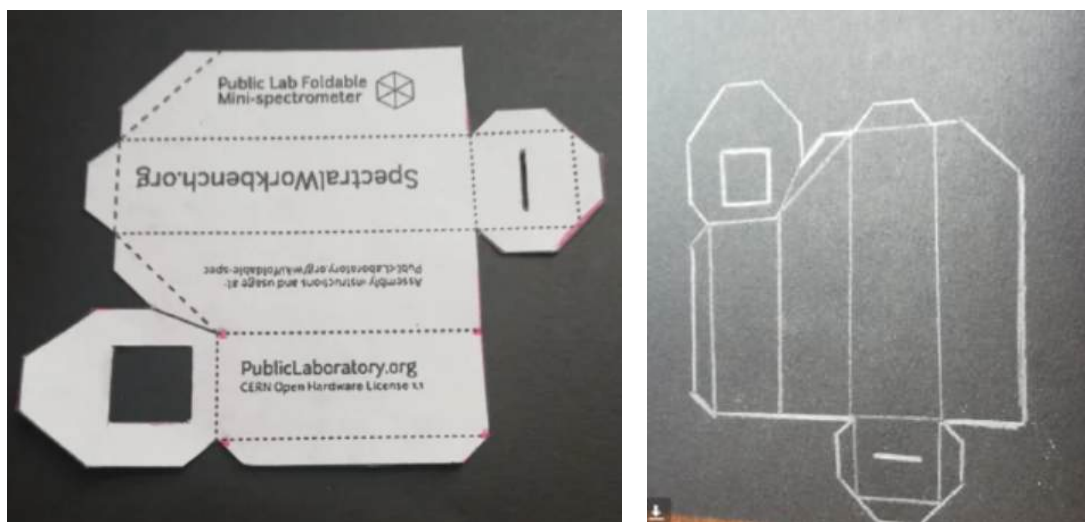
Aula #6:

Após a discussão sobre pseudociência, partimos para a segunda parte da sequência didática: o segundo experimento, que envolveu a construção de um espectrógrafo. A atividade da aula basicamente consistiu na construção de um espectrógrafo para celular, utilizando uma folha de papel, fita adesiva e um CD como grade de difração. Com este equipamento, observamos e registramos as fontes de luz utilizadas no experimento anterior.

Na atividade de construção do espectrógrafo, este foi apresentado como um instrumento científico amplamente utilizado para separar e medir as diferentes componentes espectrais da luz, ou seja, um equipamento que separa diferentes cores ou comprimentos de onda da luz. O espectrógrafo funciona dispersando a luz de uma fonte, como uma estrela, ou, no nosso caso, a luz do refletor RGB ou qualquer outra fonte luminosa, através de um prisma ou uma rede de difração, criando um espectro que é então registrado em um detector. Foram apresentados os

espectros de emissão e de absorção do átomo de hidrogênio, relacionando esses conceitos com o já mencionado salto quântico. Também foram apresentados os espectros de um corpo opaco e quente, de um gás e de outros elementos químicos. Por fim, foi dado aos alunos o molde do espectrógrafo (figura abaixo), os materiais necessários, CDs, papel preto e um passo a passo de como montar o equipamento.

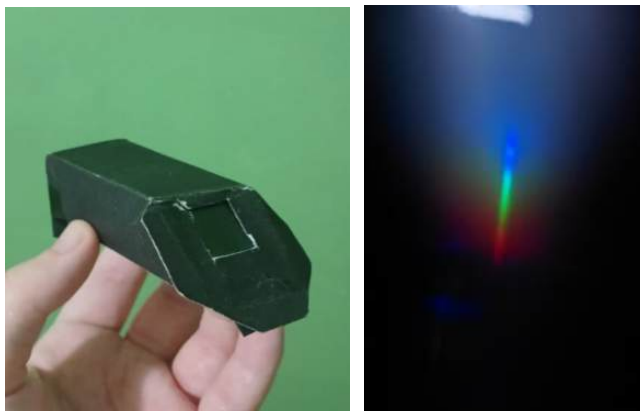
Figura 39 - Molde para construção do espectrógrafo.



Fonte: Autor

Após a atividade experimental, os alunos, em grupos, produziram um relatório. O roteiro da atividade e os detalhes da construção do espectrógrafo podem ser vistos no Apêndice - Roteiro da Construção do Espectrógrafo.

Figura 40 - (esq.) Espectrógrafo construído conforme o modelo fornecido. (dir.) Espectro da luz branca emitida por uma lâmpada fluorescente.



Fonte: Autor

Após a construção do espectrógrafo, os estudantes utilizaram o equipamento para "medir" os espectros das fontes de luz que haviam sido usadas nas aulas anteriores, como no experimento de fluorescência. Ao observar e registrar os diferentes espectros, os alunos puderam relacionar a atividade prática com os conceitos teóricos discutidos anteriormente, como emissão e absorção de luz, reforçando a compreensão tanto da natureza ondulatória da luz quanto dos espectros resultantes. Ao invés de tirarem apenas fotos, alguns estudantes colocaram o celular para filmar e colocaram o refletor RGB na função de trocar de cor lentamente, conseguindo visualizar o espectro mudando, conseguindo ótimos resultados visuais. Essa prática consolidou o aprendizado de maneira interativa e conectada com os experimentos prévios.

Aula #7:

Na aula nº 7, após a atividade experimental, discutimos as observações dos espectros. Nessa discussão, apresentamos os resultados dos espectros das diferentes lâmpadas observadas, apontando semelhanças e diferenças.

Após a construção do espectrógrafo, foram apresentados aos alunos os resultados de um experimento realizado previamente pelo professor/pesquisador no Laboratório de Física Moderna do IFGW/UNICAMP, durante sua graduação. A partir desse material, discutiu-se o espectro de diferentes lâmpadas de gás — como argônio, mercúrio e hidrogênio —, relacionando os padrões observados aos saltos quânticos e aos níveis de energia envolvidos. Também foram apresentadas algumas séries famosas, como a série de Lyman, Balmer e Paschen, além de um caso prático de análise do espectro solar com as linhas de absorção da atmosfera, incluindo CO_2 e H_2O . Além disso, foi realizada uma análise do espectro de algumas fontes de LED, incluindo vermelho, azul, verde e LED branco, utilizando um monitor de computador.

Foi apresentado aos estudantes um exemplo prático da aplicação da Lei de Wien, no qual o professor coletou dados e gerou um gráfico para calcular a temperatura do Sol a partir de seu espectro. Esse exemplo serviu para demonstrar a relação entre a radiação emitida por um corpo negro e sua temperatura, reforçando o conceito de espectros e a utilidade da Lei de Wien na determinação da temperatura de estrelas e outros corpos celestes.

Após a aula nº 7, os alunos responderam individualmente ao questionário disponível no *Microsoft Forms*. O questionário respondido está disponível no Apêndice, 'Questionário para Atividade do Espectrógrafo'. O tempo para a resposta do questionário foi de 25 minutos.

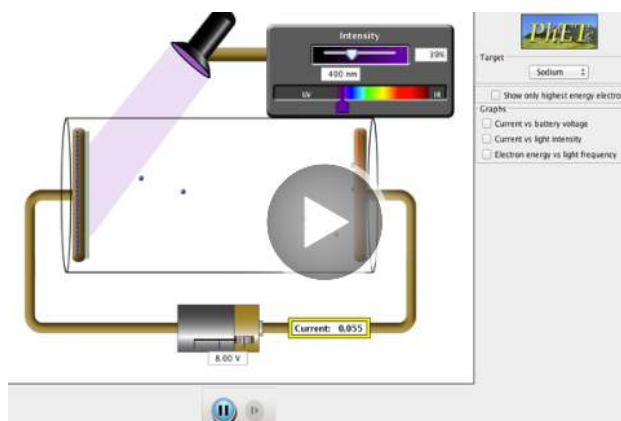
Aula #8:

Durante a aula sobre o espectrógrafo, salto quântico e suas diferentes aplicações, um estudante perguntou sobre o comportamento da luz como partícula, questionando se os espectros analisados eram um exemplo dessa aplicação. Informei que não e citei como exemplo o efeito fotoelétrico explicado por Albert Einstein. Isso motivou uma aula extra especificamente sobre o efeito fotoelétrico - foi criada uma aula extra para contemplar essa necessidade que partiu dos estudantes. A aula #8 surgiu nesse contexto.

Nesta aula, foi apresentada a montagem experimental inicial feita por Hertz, com a qual ele verificou que algumas faíscas no transmissor geravam faíscas em um detector à distância. Também foi mencionado o fenômeno observado por Stoletov e confirmado por Hertz, em 1887. Por fim, abordamos a explicação de Einstein, que descreveu os fótons como pacotes de energia proporcionais à frequência da radiação. Essa explicação do efeito fotoelétrico levou Einstein a ser premiado com o Nobel de Física em 1921 por suas contribuições à Física teórica, especialmente pela explicação do efeito fotoelétrico. Também utilizamos o simulador PHET para esta atividade, exemplificando e investigando o fenômeno. Os alunos foram encorajados a testar o simulador e alterar suas configurações para investigar o fenômeno.

Por fim, foi passado para os estudantes o vídeo “Efeito Fotoelétrico - O Nobel de Einstein”, do canal Universo Narrado, disponível em: [Efeito Fotoelétrico - O Nobel de Einstein](https://youtu.be/I9WG6IWpc20?si=cHFH6sS1R0kRyVvY-) (<https://youtu.be/I9WG6IWpc20?si=cHFH6sS1R0kRyVvY->).

Figura 41 - Simulador PHET para o efeito fotoelétrico.



Fonte: Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric. Acesso em 21 out. 2024.

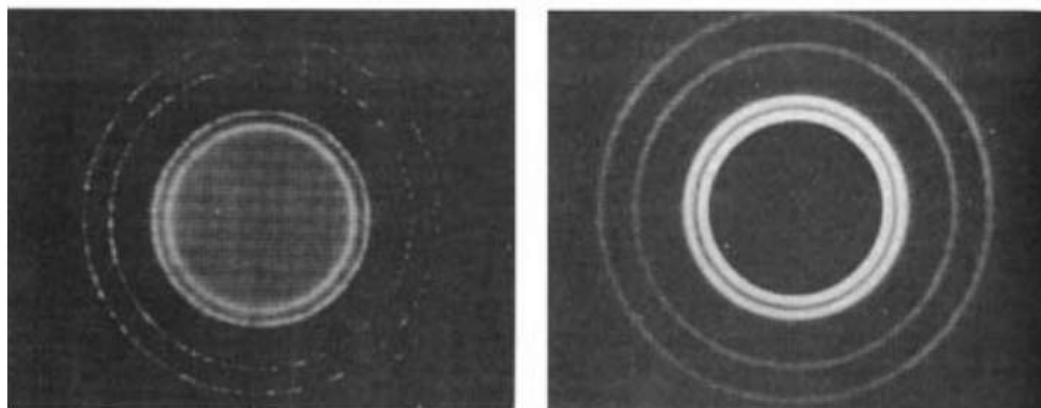
Aula #9:

Encaminhando-se para o encerramento da sequência, introduzimos a aula 9 com a pergunta: afinal, a luz é onda ou partícula? Nosso objetivo era explorar a dualidade onda-partícula já discutida anteriormente. Para isso, apresentamos o Princípio da Complementaridade de Bohr, enunciado por Niels Bohr em 1928. Também discutimos o entendimento atual da Física sobre a natureza da luz, explicando que hoje sabemos que ela é composta por fótons, que exibem comportamento tanto de onda quanto de partícula.

Introduzimos o conceito de ondas de matéria, resultado do trabalho do físico francês Louis de Broglie em 1924, para exemplificar os limites de aplicação da FQ. De Broglie questionou: se um fóton de radiação tem propriedades tanto de onda quanto de partícula, uma partícula de matéria, que possui massa, também pode ter propriedades ondulatórias e corpusculares? Sua tese rendeu-lhe o Nobel de Física em 1929. Apresentamos o modelo da matéria baseado nos trabalhos de De Broglie e discutimos alguns exemplos e aplicações, como o microscópio eletrônico.

Apresentamos também o experimento de difração de elétrons, mostrando que a matéria também tem um comportamento dual, que pode ser visto na figura 42.

Figura 42 - Figuras de difração para (a) feixe incidente de raios-X, enquanto em (b) temos o feixe composto por elétrons. Vale observar que, para o caso da figura, o comprimento de onda de de Broglie, para os elétrons, é o mesmo que o dos fótons de raios-X.



Fonte: Castilho et al. (2005, p. 528).

Por fim, realizamos uma atividade prática envolvendo as ondas de matéria de De Broglie, na qual os estudantes calcularam o comprimento de onda associado à sua própria massa corporal e velocidade estimada durante uma atividade física. Em seguida, calcularam o comprimento de onda de um elétron e compararam as ordens de grandeza dos resultados. Com isso, verificamos os limites de aplicabilidade dos modelos quânticos para partículas pequenas e exemplificamos as limitações do modelo quântico para partículas maiores.

Cabe destacar que o planejamento inicial da sequência didática previa a realização de nove aulas. No entanto, durante sua implementação, verificou-se a necessidade de ajustes no cronograma, resultando na inclusão de uma aula adicional. Essa adaptação ocorreu de forma orgânica, em resposta ao ritmo da turma e às demandas surgidas ao longo do processo, o que reforça o caráter flexível e contextual da proposta.

Aula #10

Como encerramento da sequência didática, realizamos um bate-papo sobre todas as aulas e atividades realizadas. Os pontos positivos e negativos foram levantados e discutidos. Por fim, aplicamos o questionário final em formato de prova individual, que incluía questões conceituais, perguntas sobre as opiniões dos alunos a respeito da FQ e o chamado misticismo quântico, além de solicitar alguns

comentários dos alunos. O questionário final aplicado pode ser encontrado no Apêndice.

A Sequência Didática foi aplicada com sucesso ao longo de várias aulas, proporcionando uma experiência diversificada aos alunos por meio de discussões, atividades teóricas e experimentais. A turma grande, com 41 alunos, foi um desafio em alguns momentos, mas, dentro do possível, conseguimos aplicar com sucesso todas as propostas e ainda aprofundar em alguns tópicos.

A abordagem gradual, que começou com a apresentação da FQ, evoluiu para discussões críticas e práticas de laboratório, consolidando o aprendizado dos conceitos centrais. A interação ativa dos alunos, seja na construção de espectrógrafos ou na identificação de pseudociências, foi um ponto forte da sequência, gerando engajamento sobre o conteúdo.

Ao comparar o previsto na sequência didática com a descrição do que foi realizado em sala, observa-se que a flexibilidade foi uma potencialidade significativa. Alguns conceitos, como o efeito fotoelétrico, foram incorporados ao longo do processo, evidenciando a capacidade de adaptação da sequência às necessidades dos alunos e professores. A realização de atividades extras, como a análise aprofundada de espectros e a construção de instrumentos científicos, permitiu explorar temas não previstos inicialmente, ampliando o alcance e a profundidade do aprendizado.

6 - ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos a partir de uma série de atividades aplicadas durante a implementação da sequência didática proposta. Os questionários foram projetados para avaliar o conhecimento prévio dos alunos, suas percepções e o entendimento adquirido após atividades experimentais específicas, além de uma avaliação final para consolidar os conceitos trabalhados ao longo do curso. A análise dos dados coletados visa oferecer uma visão geral sobre as contribuições da sequência didática.

A avaliação desempenha um papel central no processo de ensino e aprendizagem, configurando-se não apenas como um instrumento de mensuração de desempenho, mas, sobretudo, como um elemento orientador da prática pedagógica. Segundo Zabala (1998), a avaliação deve ser concebida também como um processo contínuo e formativo, permitindo ao professor compreender as dificuldades dos estudantes e ajustar suas estratégias didáticas para favorecer uma aprendizagem significativa. No entanto, em virtude do elevado número de estudantes na turma, nem todas as avaliações processuais realizadas ao longo das aulas puderam ser contempladas de forma sistemática nesta pesquisa. Nesse sentido, as avaliações realizadas ao longo da aplicação da sequência didática proposta neste estudo – incluindo questionários diagnósticos, questionários pós-atividades, relatórios e provas – foram estruturadas de forma a refletir essa concepção. A análise desses instrumentos possibilitou a identificação de dificuldades específicas enfrentadas pelos estudantes, bem como a aferição da efetividade das atividades propostas na construção de conhecimentos sobre a física quântica.

Ao adotar essa perspectiva formativa, a avaliação no contexto deste trabalho não se limitou à verificação de respostas corretas ou incorretas, mas abrangeu uma dimensão qualitativa, considerando os diferentes tipos de conteúdos descritos por Zabala (1998). A abordagem avaliativa utilizada buscou, portanto, compreender como os alunos interpretaram os conceitos da física quântica, como desenvolveram suas habilidades experimentais e analíticas ao longo das atividades e de que

maneira suas atitudes em relação à ciência e ao conhecimento foram impactadas. Além disso, os questionários pós-atividade permitiram identificar mudanças na percepção dos estudantes sobre o tema, enquanto os relatórios escritos ofereceram indícios do nível de apropriação dos conteúdos trabalhados. Também foram levados em consideração os relatos dos próprios estudantes durante as discussões, especialmente aqueles que mencionaram interações de familiares ou conhecidos com discursos ligados à pseudociência quântica. Dessa forma, a avaliação se consolidou como uma ferramenta essencial para a reflexão sobre o impacto da sequência didática e para a identificação de aspectos a serem aprimorados em futuras aplicações.

Na análise dos resultados dos questionários, o Questionário Inicial foi utilizado para identificar o conhecimento prévio dos alunos sobre tópicos fundamentais, como a natureza da luz, a teoria das cores e conceitos básicos de física quântica. Essa etapa foi crucial para estabelecer um ponto de partida e compreender as concepções alternativas que os alunos poderiam ter. Os resultados mostraram uma diversidade de conhecimentos, com poucos estudantes possuindo apenas noções básicas ou concepções equivocadas sobre os tópicos abordados.

Em seguida, após a atividade experimental focada na relação entre luz e cores, foi aplicado um segundo questionário para avaliar as mudanças na compreensão dos alunos sobre esses fenômenos. A análise deste questionário revelou uma melhoria significativa na compreensão dos conceitos de luz e cores, com os alunos demonstrando uma melhor capacidade de explicar e aplicar esses conceitos em diferentes contextos.

Posteriormente, com a atividade experimental do espectrógrafo, os alunos tiveram a oportunidade de aprofundar seu entendimento sobre a natureza e espectro da luz, absorção e emissão de luz, além de uma discussão sobre os modelos atômicos. As respostas dos questionários pós-atividade foram analisadas para verificar a assimilação dos conceitos e a capacidade dos alunos em aplicá-los em diferentes contextos.

Por fim, o "Questionário Final" foi aplicado como uma prova abrangente com 11 questões para avaliar o conhecimento consolidado. Os dados coletados de todas essas etapas foram organizados a seguir, visando apresentar um panorama das contribuições e dos impactos da sequência didática aplicada.

Conforme mencionado anteriormente, a sequência didática foi aplicada dentro de uma disciplina do itinerário formativo de Exatas e, por estar inserida na estrutura escolar tradicional, demandou a realização de avaliações com atribuição de notas como parte dos critérios formais de avaliação do desempenho dos alunos. Nesse contexto, algumas atividades contribuíram para a composição da nota trimestral, enquanto outras foram destinadas exclusivamente à coleta de dados para o mestrado. Essa diferença no caráter das avaliações se mostrou decisiva para o nível de participação dos alunos no registro e envio das respostas.

Entre os questionários que serão considerados para a análise dos dados, temos: 1 - Questionário Inicial, 2 - Questionário Pós-Atividade Luz e Cores, 3 - Questionário Pós-Espectrógrafo e o 4 - Questionário Final.

Os relatórios em grupo foram solicitados ao longo da aplicação, mas não foram considerados para análise para simplificação, visto que suas perguntas já estavam contempladas nos questionários aplicados.

6.1 - RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO INICIAL

Este questionário continha cinco questões, cujas respostas foram categorizadas e analisadas para identificar padrões de compreensão e concepções divergentes dos conceitos científicos comuns entre os estudantes.

Questão 1: *O que é a luz? O que você sabe sobre a natureza da luz?*

Para organizar as respostas, criamos cinco categorias, baseadas no nível de conhecimento e no tipo de explicação fornecida pelos alunos:

Quadro 3 - Categorias e respostas para questão 6.1.1

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Desconhecimento ou Conhecimento Superficial: Respostas que indicam que o aluno não tem conhecimento ou possui apenas uma noção vaga sobre a luz.	Exemplo: "Quase nada." / "Não sei ao certo dar uma definição"	Total de respostas: 3 respostas (10,7%)

Luz como Energia: Respostas que mencionam a luz como uma forma de energia, sem muitos detalhes adicionais.	Exemplo: "É uma energia." / "Luz é uma energia, visível ao olho nu."	Total de respostas: 18 respostas (64,3 %)
Luz como Onda: Respostas que descrevem a luz como uma onda eletromagnética.	Exemplo: "Eu acho que seja uma onda eletromagnética." / "Luz é uma onda eletromagnética visível."	Total de respostas: 5 respostas (17,9 %)
Luz como Partícula: Respostas que descrevem a luz como composta por partículas ou fótons.	Exemplo: "Luz é a emissão de partículas." / "Luz são fótons em espectro, não possui matéria."	Total de respostas: 1 resposta (3,6 %)
Combinações e Outros Conceitos: Respostas que combinam a descrição da luz como energia, onda ou partícula e/ou fornecem explicações detalhadas adicionais sobre a natureza da luz.	Exemplo: "A Luz é uma partícula (ou onda) que até o momento é ápice da velocidade, sendo utilizado para estudos da fotometria, espectrometria, física quântica, astronomia , entre outras áreas do conhecimento. Na natureza ela pode ser detectada de diversas maneiras, sendo partículas como os fótons, onda ou resultado da energia liberada em um sistema."	Total de respostas: 1 resposta (3,6 %)

Fonte: O autor.

A análise das respostas à questão "O que é a luz?" revela que a maioria dos alunos (64,3%) identifica a luz como uma forma de energia, mas com explicações superficiais. Apenas 17,9% mencionaram a luz como uma onda eletromagnética, e apenas 3,6% associaram a luz a partículas ou fótons. Isso sugere que muitos alunos possuem uma compreensão inicial da luz como energia, mas ainda não têm uma visão mais detalhada ou abrangente sobre a dualidade onda-partícula, aspecto essencial na física moderna

Questão 2: *A respeito da cor dos objetos, responda: a cor é uma propriedade do objeto?*

Para organizar as respostas, criamos quatro categorias, baseadas no entendimento dos alunos sobre a relação entre a cor e o objeto:

Quadro 4 - Categorias e respostas para questão 6.1.2

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Sim: Resposta simples "sim".	Sim	Total de Respostas: 1 resposta (3,6 %)
Não: Resposta simples "não".	Não	Total de Respostas: 8 respostas (28,6 %)
Não, Depende da Luz: Respostas que indicam que a cor dos objetos é percebida em função da luz que eles refletem.	Exemplo: "A cor vem a partir da luz que reflete no objeto" / "Não, depende da luz, o objeto absorve as cores que a luz proporciona, e a única que ele não absorver vai ser refletida"	Total de Respostas: 17 respostas (60,7 %)
Desconhecimento ou Conhecimento Superficial: Respostas que mostram incerteza ou falta de conhecimento sobre o conceito.	Exemplo: "Não sei explicar" / "nao lembro."	Total de Respostas: 2 respostas (7,2 %)

Fonte: O autor.

A análise das respostas à questão sobre a cor dos objetos revela que a maioria dos alunos (60,7%) compreende que a cor não é uma propriedade intrínseca do objeto, mas depende da luz refletida. Alguns alunos mencionaram que já haviam visto conceitos sobre cores nas aulas de artes, o que pode ter contribuído para essa compreensão. Entretanto, 28,6% dos alunos deram respostas simplificadas e 7,2% demonstraram desconhecimento ou incerteza.

Questão 3: Já ouviu falar em "Física Quântica"? O que você sabe sobre o tema?

Para organizar as respostas, criamos cinco categorias, baseadas no nível de conhecimento e na descrição fornecida pelos alunos:

Quadro 5 - Categorias e respostas para questão 6.1.3

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Não (nunca ouviu falar): Respostas que indicam que o aluno nunca teve contato com o tema.	Exemplo: "Não. Nada."	Total de Respostas: 1 resposta (3,6 %)
Sim, mas conhece nada ou quase nada: Respostas que indicam que o aluno já ouviu falar sobre o tema, mas possui pouco ou nenhum conhecimento detalhado.	Exemplo: "Já ouvi falar, não sei nada sobre." / "Sim, mas não sei nada sobre o tema."	Total de Respostas: 14 respostas (50,0 %)
Sim, conhecimento de ficção científica ou referências populares: Respostas que mencionam filmes, super-heróis ou outras referências populares como fonte de conhecimento.	Exemplo: "Tem a ver com super-heróis como Flash e Homem-Formiga."	Total de Respostas: 2 respostas (14,3%)
Sim, demonstra algum conhecimento técnico ou científico: Respostas que mostram algum nível de compreensão técnica ou científica sobre o tema. Basicamente as respostas falam sobre a quântica ser	Exemplo: "Sim já ouvi falar, física quântica é o estudo das coisas pequenas ou seja os átomos e menores que os átomos e a relação entre eles" / "Física quântica é relacionada à partículas pequenas."	Total de Respostas: 10 respostas (35,7 %)

uma área das partículas pequenas.		
-----------------------------------	--	--

Fonte: autor

A análise dos dados revela que, embora a maioria dos alunos (50%) já tenha ouvido falar sobre física quântica, seu conhecimento é superficial ou inexistente. Apenas uma pequena fração (3,6%) nunca teve contato com o tema, enquanto uma parte considerável (35,7%) demonstra algum entendimento técnico, mencionando corretamente que a física quântica estuda partículas pequenas. Além disso, 14,3% dos alunos fazem referências a filmes e ficção científica como fontes de conhecimento, mostrando a influência da cultura popular no entendimento inicial do tema.

Questão 4: *Já ouviu falar em "Salto Quântico"? O que você sabe sobre o tema?*

Para organizar as respostas, criamos cinco categorias, baseadas no nível de conhecimento e na descrição fornecida pelos alunos:

Quadro 6 - Categorias e respostas para questão 6.1.4

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Não (nunca ouviu falar): Respostas que indicam que o aluno nunca teve contato com o tema.	Não	Total de Respostas: 16 respostas (57,1%)
Sim, mas não sabe nada: Alunos que ouviram falar, mas não possuem conhecimento sobre o conceito.	Exemplo: “Já, mas não sei nada sobre o tema” / “sim, porém não me recordo de nada”	Total de Respostas: 4 respostas (14.3%)
Sim, com explicação incorreta ou confusa: Alunos que explicaram o conceito de forma errada ou confusa.	Exemplo: “Já ouvi falar, porém sou leigo no assunto, pelo que sei é uma teoria o qual seja possível saltar entre dimensões através da física quântica” / “O salto quântico é um uma ida para o reino quântico”.	Total de Respostas: 3 respostas (3,6%)

Sim, com explicação correta: Alunos que deram uma explicação técnica correta sobre o salto quântico.	Exemplo: "Sim, seria a mudança de um elétron de um estado quântico para outro dentro de um átomo." / "Sim. Salto quântico é um eletron muda de camada dentro de um átomo".	Total de Respostas: 3 respostas (10,7%)
Sim, referência à cultura popular (filme, etc.): Alunos que associam o conceito com filmes ou cultura popular.	Exemplo: "Já ouvi falar no filme Homem-Formiga". / "Eu já ouvi falar eu sei que é quando o homem formiga usa para viajar no tempo em vingadores ultimato"	Total de Respostas: 2 respostas (7,2%)

Fonte: autor

Os dados mostram que mais da metade dos alunos (57,1%) nunca ouviu falar no conceito de "Salto Quântico", enquanto 14,3% já ouviram falar, mas não possuem conhecimento significativo sobre o tema. Apenas 10,7% conseguiram fornecer uma explicação correta, refletindo um conhecimento técnico. Uma parte dos alunos (7,2%) relacionou o termo a referências da cultura popular, como filmes, o que sugere uma forte influência da mídia.

Questão 5: Qual o modelo atômico mais atual que você conhece? Explique em poucas palavras.

Para organizar as respostas, criamos cinco categorias, baseadas no conhecimento demonstrado sobre os modelos atômicos:

Quadro 7 - Categorias e respostas para questão 6.1.5

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Bohr: Respostas que mencionam o modelo atômico de Bohr.	Exemplo: "O modelo de Bohr. Esse modelo apresenta o átomo com um núcleo que tem prótons e neutrons." / "O modelo mais recente que eu conheço é o Bohr, que tem o núcleo e os eletrons estão em volta."	Total de Respostas: 6 respostas (21,4%)
Schrödinger: Respostas que citam o modelo de	Exemplos: "o modelo mais atual que eu conheço é o de Schrodinger, o qual diz que os elétrons tem uma posição mais provável de estar" / "Modelo atômico de schrodinger, é	Total de Respostas: 5 respostas (17,9%)

Schrödinger ou orbitais eletrônicos.	onde o elétron não possui uma posição específica."	
Rutherford: Respostas que mencionam o modelo de Rutherford.	Exemplos: "O de Rutherford, que consiste em comprovar a existência de partículas através de uma lamina de ouro e um feixe de luz" / "Eu lembro do modelo atômico de Rutherford, sobre ele apenas lembro que ele foi realizado usando um feixe de luz e uma lâmina dourada."	Total de Respostas: 2 respostas (7,1%)
Modelo planetário: Respostas que citam o modelo de planetário ou órbitas de elétrons sem mais detalhes.	Exemplo: "Modelo Planetário." / "Modelo Nuvem de Elétrons. O átomo possui vários elétrons em sua órbita."	Total de Respostas: 9 respostas (32,1%)
Desconhecimento ou resposta sem conceitos sobre modelos atômicos: Respostas que indicam desconhecimento ou estão incorretas.	Exemplo: "Bomba atômica? seria a bomba projetada pelos EUA para a guerra."	Total de Respostas: 6 respostas (21,4%)

Fonte: autor

A análise das respostas à questão sobre o modelo atômico demonstra que o conhecimento dos alunos está fragmentado e distribuído entre diferentes teorias. O modelo planetário foi o mais mencionado (32,1%), embora seja um conceito desatualizado. Um número significativo de alunos (21,4%) ainda cita o modelo de Bohr, enquanto 17,9% se referem ao modelo de Schrödinger, o mais moderno. As respostas indicam que muitos alunos possuem uma compreensão superficial (21,4%) ou confusa (7,1%) sobre os modelos atômicos.

Análise Geral

A análise geral dos resultados do Questionário Inicial revela que os alunos possuem nenhum ou um conhecimento superficial sobre os tópicos de Física Quântica. A maioria das respostas indica uma compreensão básica de conceitos

como luz e cor, mas muitas explicações carecem de profundidade. Embora alguns alunos tenham ouvido falar de termos como "física quântica" e "salto quântico", grande parte das explicações está relacionada à ficção científica ou são conceitualmente incorretas.

Embora os modelos atômicos tenham sido abordados em Química na 1ª série, podemos concluir que há um déficit de conhecimento sobre os modelos mais modernos, além de uma confusão conceitual evidente nas respostas. Esse cenário nos levou a ampliar a profundidade e o tempo dedicado ao estudo dos modelos atômicos na sequência didática.

6.2 - RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO PÓS ATIVIDADE LUZ E CORES

O objetivo deste questionário foi avaliar a compreensão dos alunos sobre a teoria das cores e fenômenos relacionados, após a realização da atividade experimental que envolveu o uso de diferentes tipos de luz e tintas.

Questão 1: *A teoria das cores (clássica) consegue explicar as fotos do desenho na luz branca e sob luzes coloridas (RGB)?*

As respostas foram agrupadas em duas categorias principais:

Quadro 8 - Categorias e respostas para questão 6.2.1

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Sim: Alunos que acreditam que a teoria das cores clássica explica corretamente os fenômenos observados.	Sim	Total de Respostas: 25 (89,2%)
Não: Alunos que acreditam que a teoria das cores clássica não consegue explicar os fenômenos observados.	Não	Total de Respostas: 3 (10,7%)

Fonte: autor

A análise mostrou que a grande maioria dos alunos (89,3%) entende que a teoria das cores clássica é suficiente para explicar os fenômenos observados com luz branca e luzes coloridas RGB.

Questão 2: *As pinturas com tinta neon “brilham” quando submetidas a quais fontes de luz?*

As respostas foram agrupadas em duas categorias principais:

Quadro 9 - Categorias e respostas para questão 6.2.2

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Luz UV: Alunos que identificaram corretamente a luz ultravioleta como a fonte que faz as tintas neon brilharem.	Luz UV	Total de Respostas: 27 (96,4%)
Outras respostas: Alunos que mencionaram outras fontes de luz ou mostraram incerteza.	Outras fontes	Total de Respostas: 1 (3,6%)

Fonte: autor

A análise indicou que quase todos os alunos (96,4%) compreenderam que a luz ultravioleta é responsável por fazer as tintas neon brilharem.

Questão 3: *A cor observada nas tintas do tipo “neon” pode ser explicada pela teoria das cores (clássica)?*

As respostas foram classificadas em quatro categorias e são apresentadas logo abaixo:

Quadro 10 - Categorias e respostas para questão 6.2.3

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Sim, a teoria das cores clássica explica: Respostas que indicam que a teoria clássica das cores pode explicar o fenômeno, embora sem detalhes.	Sim	Total de Respostas: 3 respostas (10,7%)

Não (resposta simples)	Não	Total de Respostas: 12 respostas (42,9%)
Não, a explicação envolve componentes químicos e radiação ultravioleta: Respostas que mencionam que as tintas neon brilham devido a fatores químicos ou exposição à luz UV, e que a teoria das cores clássica não explica isso.	Exemplo: "Não, pois as cores brilham ao ser colocadas em ultravioleta."	Total de Respostas: 11 respostas (39,3%)
Não soube responder: Respondeu que não sabia.		Total de Respostas: 2 respostas (7,14%)

Fonte: autor

A análise das respostas à questão sobre as tintas neon revela que a maioria dos alunos (82,1%) reconhece que o fenômeno observado com as tintas neon não pode ser explicado pela teoria clássica das cores. No entanto, uma parte significativa (42,9%) deu respostas simples e incompletas, apenas indicando "não" sem maiores explicações. Apenas 10,7% dos alunos acreditam que a teoria das cores clássica pode explicar o fenômeno, enquanto 7,14% não souberam responder.

Questão 4: *Pesquise sobre salto quântico e faça um pequeno resumo sobre os resultados encontrados no buscador.*

As respostas foram agrupadas em duas categorias principais:

Quadro 11 - Categorias e respostas para questão 6.2.4

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Respostas com Explicações Científicas: Resumos que apresentaram explicações científicas corretas sobre o salto quântico.	Exemplo: "O salto quântico é quando um elétron pula de uma camada para outra do átomo" / "É a mudança de um estado de um elétron para outro dentro de um átomo".	Total de Respostas: 10 respostas (35,7%)
Relações com Pseudociência: Resultados que trazem sites com	Exemplos: "Salto quântico na vida, consciência" / "Descubra como dar um salto	Total de Respostas: 18

conteúdos pseudocientíficos sobre quântica.	quântico em sua vida e alcançar sua melhor versão.”	respostas (64,3 %)
---	---	--------------------

Fonte: autor

A análise dos dados da questão sobre "salto quântico" mostrou que 64,3% dos alunos encontraram conteúdos relacionados à pseudociência, associando o termo a temas como "consciência", "evolução espiritual" e autoajuda. Alguns exemplos de respostas incluem referências sobre como o salto quântico pode "melhorar a vida" ou "alcançar sua melhor versão". Apenas 35,7% dos alunos apresentaram explicações científicas corretas sobre o conceito, como a transição de elétrons entre estados quânticos. Nas discussões, muitos alunos demonstraram curiosidade sobre esses resultados pseudocientíficos, mesmo tendo encontrado também as explicações científicas corretas.

Questão 5: *Qual a relação do brilho observado com a luz UV nas tintas "neon" e salto quântico?*

As respostas foram agrupadas em 3 categorias principais:

Quadro 12 - Categorias e respostas para questão 6.2.5

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Compreensão Correta: Alunos que explicaram corretamente a relação entre o brilho das tintas neon sob luz UV e o salto quântico.	Exemplos: “Com a absorção dos raios ultravioletas, acontece uma mudança de estado dos elétrons, gerando essa luz neon” / “A energia dada pela luz ultravioleta causa esse salto quântico emitindo a luz brilhante”.	Total de Respostas: 18 respostas (64,3 %)
Compreensão Parcial: Alunos que mostraram compreensão parcial dos fenômenos envolvidos.	Exemplos: “Com a absorção dos elétrons ,o estado das moléculas mudam e se adequam a partir da quantidade de luz emitida.” / “Que as tintas brilham por causa do jeito que elas refletem a luz “.	Total de Respostas: 7 respostas (25 %)
Não Sei: Alunos que indicaram não saber a resposta.		Total de Respostas: 3 respostas (10,7%)

Fonte: autor

A análise das respostas à questão 5 mostra que a maioria dos alunos (64,3%) apresentou compreensão correta sobre a relação entre o brilho das tintas neon sob luz UV e o salto quântico, descrevendo com precisão a excitação e transição dos elétrons. Contudo, uma parcela significativa (25%) demonstrou compreensão parcial, com explicações incompletas ou imprecisas sobre os processos quânticos envolvidos. Ainda, 10,7% dos alunos declararam não saber responder.

Análise Geral:

Os estudantes, em sua maioria, conseguiram assimilar os conceitos fundamentais abordados durante as atividades experimentais, especialmente em relação à teoria das cores clássica e à interação entre luz UV e tintas neon. No entanto, alguns desafios permanecem, como a imprecisão conceitual e o uso inadequado de termos, particularmente em torno do conceito de "salto quântico." Isso destaca a necessidade de reforçar a precisão científica para evitar confusões com interpretações pseudocientíficas e garantir uma melhor compreensão dos fenômenos físicos.

6.3 - RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO PÓS ESPECTRÓGRAFO

O objetivo deste questionário foi avaliar a compreensão dos alunos sobre os princípios e o funcionamento de um espectrógrafo, após a atividade experimental de construção e uso de um espectrógrafo caseiro, visando melhorar o entendimento sobre a natureza ondulatória da luz. Esse formulário, sem caráter avaliativo e aplicado no mesmo período que outras atividades avaliativas, afetou a adesão dos estudantes, resultando em menor número de respostas, mesmo com a participação de todos na atividade. Apenas 16 estudantes completaram o questionário após a atividade do espectrógrafo, evidenciando uma diminuição no envolvimento em comparação às atividades com impacto direto na nota.

Questão 1: *Compare as fotos da luz branca com as luzes coloridas. Houve alteração?*

As respostas foram agrupadas em três categorias principais:

Quadro 13 - Categorias e respostas para questão 6.3.1

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Compreensão Detalhada (Alteração observada com justificativa): Respostas que identificam alterações entre luz branca e luzes coloridas, com explicações detalhadas e corretas sobre o fenômeno.	Exemplo: "Sim, na luz branca foi possível ver um arco-íris pois a luz é branca e as cores e a formação de todas as cores por isso foi possível ver o arco-íris. Já nas luzes coloridas vermelha, verde e azul é possível ver apenas um espectro da cor da luz vermelha ou verde ou azul pois como essas cores são monocromáticas não é possível ver outra cor."	Total de Respostas: 9 respostas (56,3%)
Compreensão Geral (Alteração observada sem justificativa completa): Respostas que identificam corretamente a alteração, mas com explicações simplificadas ou incompletas.	Exemplo: "Na luz Branca, todas as 3 cores principais (vermelho, azul e verde) estão iguais, ou seja, nenhuma predomina." / "Sim, na luz branca as cores aparecem na mesma quantidade, nas coloridas, uma cor predomina."	Total de Respostas: 6 respostas (37,5%)
Resposta Confusa ou Incompleta: Respostas que mencionam alterações, mas sem clareza ou entendimento do conceito.	Exemplo: "Sim, as cores determinadas ficaram mais fortes."	Total de Respostas: 1 resposta (6,3%)

Fonte: autor

A análise das respostas à Questão 1 revela que a maioria dos alunos (56,3%) apresentou uma compreensão detalhada sobre as diferenças entre as fotos com luz branca e luzes coloridas, oferecendo justificativas corretas sobre os fenômenos observados, como a presença do arco-íris sob luz branca e a predominância de cores específicas sob luzes monocromáticas. Outros 37,5% mostraram uma compreensão geral, reconhecendo as alterações, mas sem justificar completamente. Apenas 6,3% dos alunos forneceram respostas confusas ou incompletas, indicando uma necessidade de reforço conceitual em alguns casos.

Questão 2: Compare agora com a luz UV. Houve alteração?

As respostas foram agrupadas em três categorias principais:

Quadro 14 - Categorias e respostas para questão 6.3.2

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Compreensão Detalhada (Alteração observada com explicação correta): Alunos que explicaram corretamente o fenômeno, relacionando a luz ultravioleta ao aparecimento de um espectro ou outras cores.	Exemplo: "Na luz ultravioleta há presença de todas as cores, mas o violeta se destaca muito em relação as outras "	Total de Respostas: 8 respostas (50,0%)
Compreensão Geral (Alteração observada sem explicação detalhada): Respostas que mencionam a mudança observada, mas sem explicações completas.	Exemplo: "Sim, a Luz UV é mais aproximada da cor Violeta."	Total de Respostas: 6 respostas (37,5%)
Resposta Confusa ou Incompleta: Respostas que mostram confusão ou falta de clareza.	Exemplo: "Teve uma pequena alteração."	Total de Respostas: 2 respostas (12,5%)

Fonte: autor

A metade dos estudantes demonstrou boa compreensão do conceito, com explicações detalhadas sobre a luz UV, espectrógrafo e o espectro eletromagnético.

Questão 3: *Explique o funcionamento de um espectrógrafo.*

As respostas dos alunos foram classificadas em três categorias principais:

Quadro 15 - Categorias e respostas para questão 6.3.3

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Compreensão Completa e Detalhada: Respostas que	Exemplo: "Um elemento dispersivo (prisma ou rede de difração) colocado no seu interior, decompõe a luz que incide sobre a fenda de	Total de Respostas: 7

explicam corretamente o funcionamento de um espectrógrafo, abordando aspectos como o uso de elementos dispersivos, como prisma ou rede de difração, e o processo de dispersão da luz em diferentes comprimentos de onda.	entrada, produzindo um espectro na região de saída."	respostas (43,8%).
Compreensão Geral: Respostas que apresentam uma explicação simplificada, mas essencialmente correta.	Exemplo: "O espectrógrafo dispersa a luz através da difração."	Total de Respostas: 6 respostas (37,5%).
Compreensão Incompleta ou Confusa: Respostas que mencionam o funcionamento de um espectrógrafo de maneira superficial ou com erros conceituais.	Exemplo: "O espectrografo abre a luz."	Total de Respostas: 3 respostas (18,7%).

Fonte: autor

Essa análise mostra que a maioria dos alunos compreende de maneira satisfatória o funcionamento do espectrógrafo, com 81,3% fornecendo respostas completas ou gerais.

Análise Geral:

O questionário pós-espectrógrafo trouxe resultados positivos no entendimento dos alunos sobre os princípios e o funcionamento do espectrógrafo, assim como sobre a natureza ondulatória da luz. A maioria dos alunos apresentou uma compreensão parcial ou geral dos fenômenos investigados. Contudo, alguns desafios permanecem, especialmente no que diz respeito à precisão conceitual em um número de respostas que se mostraram confusas ou incompletas, além da baixa adesão nas respostas dessa atividade.

6.4 - RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO FINAL

O objetivo do Questionário Final foi avaliar o conhecimento adquirido pelos alunos ao longo do curso sobre Física Quântica e outros conceitos relacionados, após a aplicação da sequência didática e das atividades experimentais. Esse questionário foi aplicado no formato de avaliação individual, com valor de 10 pontos, sendo considerado um elemento avaliativo na rotina escolar. Foi a única atividade da sequência didática aplicada nesse formato.

Questão 1: *Já assistiu a algum filme, série ou jogo que menciona Física quântica? Descreva essa situação e explique de que forma ela influencia a compreensão desse tema pela sociedade.*

As respostas foram agrupadas em quatro categorias principais:

Quadro 16 - Categorias e respostas para questão 6.4.1

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Filmes e Séries Populares (Homem-Formiga, Vingadores, The Flash): Alunos que mencionaram filmes e séries populares que abordam Física Quântica.	Exemplo: “Sim, no filme “Homem formiga” que traz a física quântica como ciência que estuda sobre coisas de tamanho de átomos”.	Total de Respostas: 16 respostas (57%)
Vídeos Educativos e Documentários : Alunos que citaram vídeos educativos ou documentários científicos.	Exemplo: “Sim, já ouvi falar sobre física quântica em documentários como “Einstein e a Bomba”. Os filmes podem divulgar essa parte da física e explicar conceitos básicos.”	Total de Respostas: 4 respostas (14%)
Vídeos ou conteúdos pseudocientíficos: Alunos que mencionaram que viram vídeos em rede social ou na internet em geral.	Exemplo: “Sim, já vi um vídeo que mencionava a física quântica como algo que iria te ajudar a mudar de vida. Servia também para tentar convencer a pessoa a comprar um produto que o site disponibilizava”.	Total de Respostas: 4 respostas (14%)

Não Assistiu ou Não Lembra: Alunos que não assistiram a nenhum conteúdo relacionado ou não se lembram.	Exemplo: “Não, infelizmente nunca vi um filme, jogo ou série mencionando salto quântico”.	Total de Respostas: 4 respostas (14%)
---	--	--

Fonte: autor

A análise das respostas à questão 1 revela que a maioria dos alunos (57%) mencionou filmes e séries populares, como *Homem-Formiga* e *Vingadores*, como principais referências sobre física quântica, indicando que essas produções têm grande influência na percepção pública do tema. Outros 14% citaram vídeos educativos e documentários, enquanto 14% mencionaram conteúdos pseudocientíficos, o que destaca a presença de informações imprecisas sobre o assunto. Ainda, 14% dos alunos afirmaram não ter assistido ou não se lembrar de conteúdo relacionado.

Questão 2: *As folhas de uma árvore, quando iluminadas pela luz do Sol, mostram-se verdes porque:*

- a) *refletem difusamente a luz verde do espectro solar;*
- b) *absorvem somente a luz verde do espectro solar;*
- c) *refletem difusamente todas as cores do espectro solar, exceto o verde;*
- d) *difratam unicamente a luz verde do espectro solar;*
- e) *a visão humana é mais sensível a essa cor.*

A análise das respostas para a Questão 2 mostra que 24 alunos marcaram a alternativa correta (a), o que corresponde a 85,7% dos participantes, indicando que a maioria compreendeu corretamente o fenômeno de reflexão difusa da luz verde pelas folhas. No entanto, 2 alunos escolheram a alternativa (d), representando 7,1%, o que sugere uma confusão com o conceito de difração. Além disso, 1 aluno optou pela alternativa (c) (3,6%) e 1 aluno deixou a questão em branco (3,6%).

Questão 3: *Às vezes, produtos de uso comum são anunciados como sendo baseados em princípios quânticos. Já viu algo assim? Descreva e comente sua opinião.*

As respostas foram agrupadas em três categorias principais:

Quadro 17 - Categorias e respostas para questão 6.4.3

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Produtos Pseudocientíficos (Colchões, Remédios, Chás): Alunos que mencionaram produtos anunciados com base em princípios quânticos, destacando a falta de fundamentação científica e o potencial engano ao consumidor.	Exemplo: “Sim, já vi ‘remédios’ e ‘chás’ quânticos, que prometiam mudar sua vida”.	Total de Respostas: 16 respostas (57%)
Cursos e Terapias Quânticas: Alunos que citaram cursos, terapias ou outros serviços que usam a Física quântica como argumento de venda.	Exemplo: “Sim, produtos como e-books ou cursos de coach prometiam que ao comprá-los e ver os ensinamentos, você iria dar um salto quântico na sua vida”.	Total de Respostas: 6 respostas (21%)
Não Viu ou Não Lembra: Alunos que não viram ou não lembram de produtos ou serviços anunciados com base em princípios quânticos.	Exemplo: “Não, não me recordo de ter visto algo assim.	Total de Respostas: 6 respostas (21%)

Fonte: autor

Questão 4: *Supondo que no interior de uma sala haja três objetos de cores distintas: verde, azul e vermelho. De que cor, respectivamente, veremos esses objetos se essa sala for iluminada por uma luz de cor azul?*

- a) Azul, azul e roxo;
- b) Verde, azul e roxo;
- c) Preto, azul e preto;
- d) Todos azuis;
- e) Branco, azul e branco.

Notamos uma predominância significativa da alternativa correta (c), escolhida por 16 dos 28 alunos (57,1%). Outras respostas como (a) (6 respostas) e (b) (4

respostas) revelam confusão em alguns conceitos sobre iluminação e percepção de cores sob luz azul. As alternativas (d) e (e) tiveram apenas uma marcação cada. Isso indica que, embora a maioria dos estudantes tenha compreendido corretamente o fenômeno, um grupo ainda possui dificuldades em aplicar o conceito de forma precisa.

Questão 5: *Em nossas aulas, discutimos sobre terapias ou práticas de cura que afirmam utilizar a Física quântica. A partir das discussões realizadas em aula, dê sua opinião sobre tais práticas.*

As respostas foram agrupadas em quatro categorias principais:

Quadro 18 - Categorias e respostas para questão 6.4.5

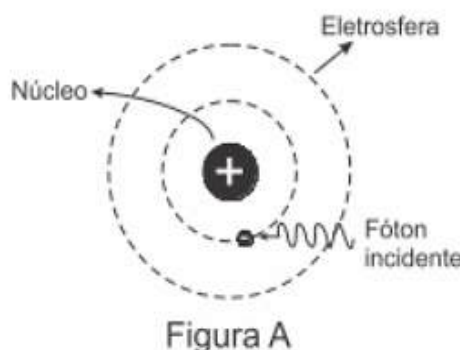
Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Críticas às Práticas Pseudocientíficas: Alunos que criticaram veementemente essas práticas, destacando a falta de comprovação científica e o potencial prejuízo à saúde pública.	Exemplo: “Estas propagandas enganosas servem para extorsão de clientes leigos sobre o assunto. Cientificamente falando é totalmente errado e não há nenhuma comprovação científica para sustentar as terapias de cura quântica”.	Total de Respostas: 14 respostas (50%)
Reconhecimento de Manipulação e Engano: Alunos que reconheceram a manipulação de conceitos científicos para enganar o público, ressaltando a importância do discernimento crítico.	Exemplo: “Acho que isso é mentira. Normalmente eles falam que é física quântica, mas logo depois falam de outra coisa, dão outros argumentos que até mesmo contrariam a física quântica, mas infelizmente muitos ainda acreditam”.	Total de Respostas: 8 respostas (29%)
Opinião favorável à pseudociência: Alunos que não consideram o uso não científico como um problema.	Exemplo: “Bom eu não vejo problema desde que as normas de segurança estejam certas e que a prática não seja usada com frequência no mesmo paciente podendo até causar ou piorar a situação”.	Total de Respostas: 4 respostas (14%)

Não Sei ou Não Opinaram: Alunos que não souberam opinar ou preferiram não comentar sobre o tema.		Total de Respostas: 2 respostas(7%)
--	--	---

Fonte: autor

A análise das respostas à questão 5 mostra que metade dos alunos (50%) manifestou críticas contundentes a práticas de cura associadas à “física quântica”, sublinhando a falta de comprovação científica e o risco à saúde pública. Outros 29% reconheceram a manipulação e engano inerentes ao uso incorreto do termo para atrair o público, indicando consciência sobre o uso pseudocientífico de conceitos. Um grupo menor (14%) expressou uma opinião neutra ou indiferente, respeitando a liberdade de crença, enquanto 7% não souberam ou preferiram não opinar.

Questão 6: *O modelo atômico de Bohr pode ser utilizado para explicar a absorção da luz vermelha pela clorofila e a emissão da luz NIR, considerando a luz como fótons, conforme figura A abaixo.*

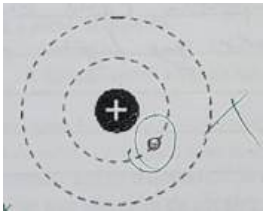
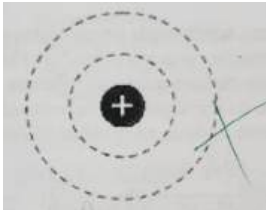


- a) *Desenhe a posição do elétron depois que o fóton incidiu sobre o átomo - figura a. Explique o que ocorreu.*
- b) *Desenhe a energia absorvida do fóton incidente sendo liberada e a posição do elétron após essa liberação. Explique o que ocorreu.*

As respostas do item a) foram agrupadas em cinco categorias principais:

Quadro 19 - Categorias e respostas para questão 6.4.6.a

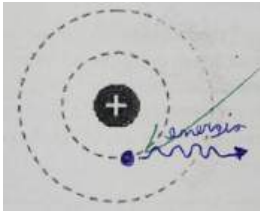
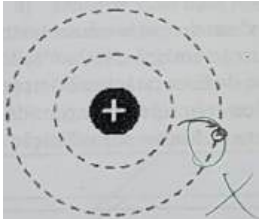
Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
-----------	--------------------------	-----------------

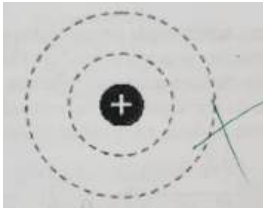
Desenho Correto e Explicação Completa: Alunos que desenharam corretamente a posição do elétron e forneceram uma explicação completa e correta sobre o salto quântico.	Exemplo: “Quando o fóton incide no elétron, a quantidade de energia desse elétron aumenta e se a quantidade de energia foi o necessário, ocorre um salto quântico”. Exemplo de desenho correto: 	Total de Respostas: 10 respostas (36%)
Desenho Correto e Explicação Parcial: Alunos que desenharam corretamente a posição do elétron, mas apresentaram explicações parciais.	Exemplo: “Quando o fóton incidiu no átomo, ele absorveu essa energia e foi para camada mais externa”.	Total de Respostas: 8 respostas (29%)
Desenho Correto e Explicação Incorreta: Alunos que desenharam corretamente a posição do elétron, mas forneceram explicações incorretas.	Exemplo: “Ocorreu que o elétron se manteve na sua eletrosfera sem ir para outra.”	Total de Respostas: 4 respostas (14%)
Desenho Incorreto e Explicação Vaga: Alunos que desenharam incorretamente a posição do elétron e forneceram explicações vagas.	Exemplo: “O fóton incidiu”. Exemplo de desenho incorreto: 	Total de Respostas: 4 respostas (14%)
Não Responderam ou Desenharam em Branco: Alunos que não responderam ou deixaram a questão em branco.	Exemplo de desenho em branco: 	Total de Respostas: 2 respostas (7%)

Fonte: autor

As respostas do item b) foram agrupadas em cinco categorias principais:

Quadro 20 - Categorias e respostas para questão 6.4.6.b

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Desenho Correto e Explicação Completa: Alunos que desenharam corretamente a posição do elétron e o fóton emitido, fornecendo uma explicação completa e correta sobre a liberação de energia.	Exemplo: “O elétron voltou para sua camada inicial, onde ele é mais estável e liberou a energia em forma de fóton”. Exemplo de desenho correto: 	Total de Respostas: 12 respostas (43%)
Desenho Correto e Explicação Parcial: Alunos que desenharam corretamente a posição do elétron e o fóton emitido, mas apresentaram explicações parciais.	Exemplo: “Para perder essa energia, o átomo volta para camada inicial”	Total de Respostas: 8 respostas (29%)
Desenho Correto e Explicação Incorreta: Alunos que desenharam corretamente a posição do elétron e o fóton emitido, mas forneceram explicações incorretas.	Exemplo: “Ocorreu que o elétron recebeu energia e com isso ele mudou de uma eletrosfera para outra”.	Total de Respostas: 4 respostas (14%)
Desenho Incorreto e Explicação Vaga: Alunos que desenharam incorretamente a posição do elétron e forneceram explicações vagas.	Exemplo: “O fóton absorveu energia e depois a energia que sobrou foi liberada”. Exemplo de desenho incorreto: 	Total de Respostas: 2 respostas (7%)

Não Responderam ou não souberam: Alunos que não souberam responder ou deixaram a questão em branco.	Exemplo de desenho em branco: 	Total de Respostas: 2 respostas (7%)
--	---	--

Fonte: autor

A análise das respostas para a Questão 6, sobre o modelo atômico de Bohr e o comportamento do elétron ao absorver e liberar energia, revela que a compreensão dos alunos é, em sua maioria, satisfatória, com 36% no item (a) e 43% no item (b) apresentando desenhos corretos e explicações completas. Esses alunos demonstraram domínio dos conceitos de salto quântico e liberação de energia. Entretanto, uma parcela significativa (29% em ambos os itens) mostrou compreensão parcial, enquanto outros forneceram explicações incorretas (14% em cada item), ou deram respostas vagas e imprecisas (14% em (a) e 7% em (b)).

Questão 7: *Como estudante do Ensino Médio, o que você acha que poderia ser feito em sala de aula para esclarecer equívocos comuns sobre a Física quântica? Como professores podem tornar esses conceitos mais acessíveis e compreensíveis para todos?*

As respostas foram agrupadas em cinco categorias principais:

Quadro 21 - Categorias e respostas para questão 6.4.7

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Didática e Estrutura das Aulas: Estudantes que sugeriram mudanças na forma como as aulas são ministradas, nos recursos didáticos utilizados ou na organização estrutural das atividades.	Exemplo: “Os professores podem explicar com uma linguagem não tão técnica para ficar mais fácil. Eles tentam ensinar igual aprenderam na faculdade”.	Total de Respostas: 7 estudantes (25%)
Uso de Filmes, Séries e Cultura Pop: Estudantes	Exemplo: “Acho que para esclarecer equívocos, os alunos podem perguntar de	Total de Respostas: 4

que sugeriram a utilização de referências de filmes, séries e cultura pop para contextualizar e facilitar a compreensão dos conceitos de física quântica.	algum filme/série ou os professores citarem e comentarem	estudantes (14,3%)
Recursos Visuais e Experimento: Estudantes que recomendaram o uso de imagens, diagramas e experimentos simples para tornar os conceitos mais concretos e compreensíveis.	Exemplo: “Mostrar experimentos científicos que comprovam os equívocos comuns que as pessoas tem sobre o assunto. Usar mais imagens e vídeos.	Total de Respostas: 7 estudantes (25%)
Ensino Crítico e Correção de Equívocos: Estudantes que propuseram aulas mais críticas, com análises de pseudociências e correções de uso incorreto de termos, promovendo um entendimento mais preciso.	Exemplo: “Eu acho que poderia ser ensinado como identificar o uso correto da física e o equivocado dos termos e conceitos, assim com a definição certa pode ser identificado mais facilmente o erros.”	Total de Respostas: 5 estudantes (17,8%)
Expansão Curricular: Estudantes que sugeriram aumentar a carga horária sobre o tema ou criar um itinerário específico para um estudo mais aprofundado da física quântica.	Exemplo: “Acredito que poderiam ser dadas mais aulas sobre o assunto ou até mesmo poderia haver uma matéria específica para física quântica, como um itinerário próprio para isso”.	Total de Respostas: 5 estudantes (17,8%)

Fonte: autor

As respostas dos estudantes foram bem distribuídas entre cinco categorias, indicando uma variedade de perspectivas sobre como tornar a física quântica mais acessível. As categorias Didática e Estrutura das Aulas e Recursos Visuais e Experimentos tiveram maior número de sugestões (25% cada), refletindo o desejo dos alunos por uma abordagem prática e uma comunicação mais acessível. O Uso de Filmes, Séries e Cultura Pop também foi destacado, com 14,3% dos alunos

sugerindo a contextualização dos conceitos por meio de referências culturais. Curiosamente, um estudante propôs uma campanha em redes sociais para combater desinformação e pseudociência, usando posts educativos para desmistificar equívocos sobre física quântica. As categorias Ensino Crítico e Correção de Equívocos (17,8%) e Expansão Curricular (17,8%) mostram ainda o interesse dos estudantes tanto em análises críticas quanto em um aprofundamento maior no tema.

Embora as sugestões dos estudantes indiquem estratégias que, em sua percepção, poderiam facilitar a aprendizagem em Física Quântica, é importante reconhecer que essas opiniões refletem um recorte pontual, baseado em suas experiências como alunos. A falta de um conhecimento mais aprofundado sobre metodologias de ensino limita o alcance dessas contribuições, que devem ser entendidas como indicativos contextuais, e não como orientações pedagógicas definitivas. Ainda assim, esses relatos oferecem subsídios relevantes sobre as estratégias pensadas pelos estudantes e possíveis caminhos para práticas mais significativas.

Questão 8: *A natureza da luz é uma questão que preocupa os físicos há muito tempo. No decorrer da história da Física, houve predomínio ora da teoria corpuscular - a luz seria constituída de partículas - ora da teoria ondulatória - a luz seria uma onda.*

- a) *Descreva a concepção atual sobre a natureza da luz.*
- b) *Descreva, resumidamente, uma observação experimental que sirva de evidência para a concepção descrita no item anterior.*

As respostas dos alunos sobre o **item a)** da natureza da luz foram organizadas em cinco categorias, cada uma refletindo diferentes níveis de entendimento sobre a dualidade onda-partícula.

Quadro 22 - Categorias e respostas para questão 6.4.8.a

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Dualidade Onda-Partícula: estudantes reconheceram a	Exemplo: "A concepção atual sobre a natureza da luz é que ela é as duas coisas, tanto partícula quanto luz. Vai depender de	Total de Respostas: 18 respostas (64,3%)

concepção moderna da natureza dual da luz, entendendo que ela pode comportar-se como onda ou partícula, dependendo do contexto do experimento.	como ela é estudada. Quando ela precisar agir como uma onda, ela vai agir como onda. E quando precisar agir como partícula, vai agir como partícula."	
Comportamento de Onda: os alunos descrevem a luz predominantemente como uma onda, sem mencionar sua natureza dual. Embora essa descrição não esteja errada, falta o entendimento da dualidade, essencial na teoria quântica moderna.	Exemplo: "Atualmente a concepção sobre a luz é que ela seria uma onda."	Total de Respostas: 3 respostas (10,7%)
Comportamento de Partícula: os alunos descrevem o comportamento de partícula da luz, sem mencionar sua natureza dual.	Exemplo: "A luz é composta dos fótons que são partículas".	Total de Respostas: 1 resposta (3,6%)
Descrição Incompleta ou Alternativa: inclui respostas em que os alunos oferecem uma descrição parcial ou alternativa sobre a natureza da luz.	Exemplo: "Nós podemos escrevê-la como um elétron que se excita e pula para outra camada eletrônica liberando energia."	Total de Respostas: 5 respostas (17,8%)
Em branco:		Total de Respostas: 1 resposta (3,6%)

Fonte: autor

A maioria dos estudantes (64,3%) demonstrou compreensão da concepção moderna da luz como uma entidade de natureza dual, capaz de manifestar-se como onda ou partícula dependendo do contexto experimental. No entanto, uma fração dos alunos (10,7%) descreveu exclusivamente o comportamento ondulatório da luz, enquanto 3,6% mencionaram apenas o comportamento corpuscular, indicando uma

compreensão parcial do conceito. Além disso, 17,8% apresentaram respostas incompletas ou alternativas, refletindo uma dificuldade em articular o conceito de dualidade.

Agora apresentaremos os dados referentes ao item b):

Quadro 23 - Categorias e respostas para questão 6.4.8.b

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Efeito Fotoelétrico como Evidência da Natureza Partícula da Luz: esta categoria agrupa as respostas que referenciam explicitamente o efeito fotoelétrico, reconhecendo-o como uma evidência da natureza corpuscular da luz.	Exemplo: “Um experimento que comprovou isso foi o efeito fotoelétrico, o qual consiste na incidência da radiação eletromagnética em um ferro e após a incidência a liberação de elétrons no comportamento de partícula da luz.”	Total de Respostas: 3 respostas (10,7%)
Espectrógrafo como Evidência da Natureza de Onda da Luz: nesta categoria, estão as respostas que mencionam o espectrógrafo como um instrumento capaz de demonstrar o comportamento ondulatório da luz.	Exemplo: “Durante o uso de espectrógrafo, a luz está se comportando como onda”.	Total de Respostas: 8 respostas (28,6 %)
Princípio da Dualidade Onda-Partícula: respostas que reconhecem a dualidade da luz, compreendendo que ela se comporta como onda ou partícula dependendo das condições e do contexto do experimento.	Exemplo: “Um exemplo para falar que a luz é uma onda é o exemplo do experimento de espectrógrafo. E o de partícula é o exemplo do experimento de Einstein.”	Total de Respostas: 2 respostas (7,2 %)
Referências Incorretas sobre Experimentos e Natureza da Luz: essa	Exemplo: “Um experimento que comprova que a luz é constituída de partículas é o experimento da lâmina de ouro de Rutherford.”	Total de respostas: 10 respostas(35,7%)

categoria é específica para respostas que mencionam experimentos com associações incorretas em relação à natureza da luz.		
Respostas em Branco: respostas que os alunos deixaram em branco, sem qualquer menção ao conteúdo da pergunta.		Total de respostas: 5 respostas (17,8%)

Fonte: autor

A análise das respostas do item B revela uma compreensão parcial e algumas fragilidades na associação entre experimentos e os fenômenos discutidos sobre a natureza dual da luz. Embora 10,7% dos alunos identifiquem corretamente o efeito fotoelétrico como evidência da natureza corpuscular e 28,6% citem o espectrógrafo para demonstrar o comportamento ondulatório, apenas 7,2% abordam explicitamente o princípio da dualidade onda-partícula.

A maior parte das respostas (35,7%) apresenta associações incorretas, evidenciando uma dificuldade em relacionar corretamente os experimentos com os fenômenos observados, o que sugere uma fragilidade conceitual nessa área. Além disso, as respostas em branco (17,8%) reforçam essa questão, indicando dificuldade em conectar teoria e prática experimental. Esses dados apontam para uma necessidade de abordagem mais clara e detalhada sobre como os experimentos suportam os conceitos discutidos.

Questão 9: *Muitas vezes, ouvimos falar sobre a ideia de "saltos quânticos" sendo usada em contextos que podem não ter base científica. Você já encontrou alguma situação em que o termo "salto quântico" foi usado de maneira incorreta ou exagerada fora do contexto da Física quântica? Descreva essa situação e explique por que você acredita que essa aplicação do termo pode ser considerada pseudocientífica. Como podemos distinguir entre o uso correto na Física e sua utilização equivocada em outros contextos?*

Analizamos, separadamente, as duas partes da questão 9. Para a primeira parte, as respostas dos alunos podem ser classificadas nas seguintes categorias, com base nos contextos onde o termo foi mencionado incorretamente:

Quadro 24 - Categorias e respostas para questão 6.4.9

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Aplicação em Autoajuda e Desenvolvimento Pessoal: Uso do termo "salto quântico" em contextos de autoajuda, motivação ou evolução pessoal.	Exemplo: "Podemos ver esse tipo de situação com os chamados coaches quânticos, que vendem cursos com a frase 'dê um salto quântico em sua carreira.'"	Total de Respostas: 16 respostas (57,1%)
Uso em Produtos de Saúde e Terapias (Cura Quântica): Aplicação do termo em produtos e terapias de saúde que prometem benefícios na saúde sem base científica.	Exemplo: "Sim, como propaganda de remédios que indicam uma melhora a partir de saltos quânticos."	Total de Respostas: 7 respostas (25%)
Referência em Mídia de Entretenimento e Ficção Científica: Uso do termo em filmes, séries, ou esportes, para descrever fenômenos fictícios ou exagerados.	Exemplo: "No filme Homem-Formiga, é dada a ideia de salto quântico como a mudança extrema de tamanho do personagem."	Total de Respostas: 1 resposta (3,6%)
Associação com Espiritualidade e Energia Quântica: Termo associado a práticas espirituais ou "energia quântica" para ganhos espirituais ou emocionais.	Exemplo: "Vi exemplos dessa situação em sites que utilizam a quântica como algo espiritual para evoluir na vida."	Total de Respostas: 2 respostas (7,1%)
Contexto de Pseudociência Geral sem Explicação Detalhada: Uso do termo "salto quântico" classificado	Exemplo: "Sim, vi uma situação onde o termo salto quântico foi usado fora do contexto da física. Isso é pseudociência, pois se baseia em opinião e não em algo científico comprovado."	Total de Respostas: 2 respostas (7,1%)

como pseudociência, mas com explicações vagas.		
--	--	--

Fonte: autor

A análise das respostas para primeira pergunta da questão 9 mostra que a maioria dos alunos (57,1%) identificou o uso incorreto de "salto quântico" em contextos de autoajuda, sites motivacionais, enquanto 25% observaram o termo em produtos de saúde que prometem benefícios sem base científica ("cura quântica"). Outros (3,6%) mencionaram o uso em mídias de ficção e uma parcela (7,1%) associou o termo a espiritualidade ou pseudociência de maneira geral. Esses resultados indicam que os alunos, em sua maioria, conseguem reconhecer e criticar o uso pseudocientífico do termo, principalmente em áreas de desenvolvimento pessoal e saúde - como no caso dos coaches.

Para a segunda parte da questão, *"Como podemos distinguir entre o uso correto na Física e sua utilização equivocada em outros contextos?"*, as respostas dos alunos podem ser classificadas nas seguintes categorias, com base nos métodos e orientações que eles mencionaram para diferenciar ciência de pseudociência:

Quadro 25 - Categorias e respostas para questão 6.4.10

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Consulta a Fontes Confiáveis e Literatura Científica: Respostas que indicam o uso de fontes confiáveis, como livros de física e artigos científicos, para verificar se a aplicação do termo "salto quântico" é adequada.	Exemplo: "Podemos distinguir entre o uso correto e o incorreto pesquisando o termo em fontes científicas e livros sobre o assunto."	Total de Respostas: 9 respostas (32,1%)
Análise Crítica da Linguagem e Contexto: Alunos que sugerem avaliar o contexto e a linguagem em	Exemplo: "Ao analisar o contexto, se o termo é usado de maneira metafórica ou exagerada, provavelmente é pseudociência."	Total de Respostas: 8 respostas (28,6%)

que o termo é usado, identificando exageros e interpretações metafóricas como sinais de pseudociência.		
Comparação com o Conceito Científico Original: Respostas que mencionam a importância de conhecer o conceito científico de "salto quântico" para comparar e identificar distorções em contextos incorretos.	Exemplo: "Entendendo o que é um salto quântico na física, é fácil ver que isso se aplica apenas a átomos e não à vida pessoal."	Total de Respostas: 5 respostas (17,9%)
Verificação da Evidência e Base Científica do Uso: Alunos que mencionam verificar se há evidências ou estudos científicos que respaldam o uso do termo "salto quântico" em outros contextos, como saúde ou espiritualidade.	Exemplo: "Distinguimos o uso correto quando há estudos e experimentos que comprovem os efeitos citados."	Total de Respostas: 4 respostas (14,3%)
Identificação de Intenções Comerciais e Promessas Incomuns: Respostas que sugerem prestar atenção em intenções comerciais ou promessas de resultados rápidos 'milagrosos' como sinais de pseudociência, especialmente em anúncios de produtos ou terapias.	Exemplo: "Quando o termo aparece em anúncios com promessas de melhorar a vida ou vender produtos, isso é sinal de pseudociência."	Total de Respostas: 2 respostas (7,1%)

Fonte: autor

A análise das respostas à segunda parte da questão revela que a maioria dos alunos propõe o uso de fontes confiáveis e literatura científica (32,1%) como

principal recurso para distinguir o uso correto de “salto quântico” de aplicações pseudocientíficas. Outros (28,6%) destacam a importância de avaliar o contexto e a linguagem, sugerindo uma abordagem crítica para identificar exageros e metáforas. Além disso, 17,9% dos alunos sugerem comparar o uso com o conceito científico original, mostrando que alguns compreendem a necessidade de entender o termo na física para identificar distorções. Menores percentuais mencionaram a verificação de evidências científicas (14,3%) e a identificação de intenções comerciais (7,1%) como sinais de pseudociência.

Questão 10: *Leia o enunciado abaixo, sobre as órbitas eletrônicas.*

“As órbitas eletrônicas em torno dos núcleos atômicos devem conter um número inteiro N de comprimentos de onda de Broglie do elétron.”

Considere as seguintes afirmações sobre o enunciado acima.

- I. Ele evidencia o comportamento onda-partícula do elétron.*
- II. Ele assegura que as órbitas eletrônicas são sempre circunferências.*
- III. Ele define o número quântico N que identifica a órbita ocupada pelo elétron.*

Quais estão corretas?

- a) Apenas I.*
- b) Apenas II.*
- c) Apenas I e III.*
- d) Apenas II e III.*
- e) I, II e III.*

A alternativa correta para a questão era "c", que afirma que apenas as afirmações I e III estão corretas. A maioria dos alunos selecionou a resposta correta, com 19 alunos (67,9%) escolhendo a alternativa "c". No entanto, alguns alunos selecionaram respostas incorretas: 9 alunos (32,1%) responderam incorretamente, escolhendo alternativas "a" (6 alunos), "d" (1 aluno), e "e" (2 alunos).

Esses dados sugerem que a maioria dos estudantes conseguiu compreender corretamente os conceitos abordados na questão envolvendo a teoria de de Broglie, mas uma pequena parte ainda apresenta dificuldades em distinguir os conceitos de comportamento onda-partícula e número quântico.

Questão 11: *Texto para a próxima questão:*

A Relação entre a Teoria das Cores e Fenômenos Quânticos na Observação de Cores

A teoria das cores RGB baseia-se na mistura aditiva de três cores de luz (vermelho, verde e azul) para criar a percepção de várias cores pelo olho humano. Este modelo explica como percebemos cores sob a iluminação padrão. Contudo, alguns fenômenos de emissão de luz, como a fluorescência e a fosforescência, apresentam características que vão além da simples mistura de luz visível. Estes fenômenos são comumente observados em materiais 'neon' sob certas condições de iluminação.

A fluorescência e a fosforescência ocorrem quando substâncias específicas absorvem fótons de luz e reemitem essa luz após um breve período, mas com uma energia diferente daquela inicialmente absorvida, resultando em cores vibrantes e, muitas vezes, na faixa do ultravioleta, não visíveis ao olho humano sem ajuda.

Com base no texto e em seus conhecimentos, responda:

- a) Explique, com base nos princípios da mecânica quântica, por que a teoria das cores RGB é insuficiente para descrever completamente os fenômenos da fluorescência e da fosforescência.*
- b) Descreva o processo pelo qual as tintas 'neon' são capazes de emitir luz visível quando expostas à luz ultravioleta e como isso se relaciona com os conceitos de níveis de energia e transições eletrônicas na Física quântica.*

Análise das respostas e categorias para alternativa a):

Quadro 26 - Categorias e respostas para questão 6.4.11.a

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Compreensão Completa: A resposta explica adequadamente a fluorescência e/ou fosforescência e menciona explicitamente salto quântico.	Exemplo: "A teoria das cores clássica não pode explicar esse fenômeno pois este explica somente a interação entre objeto e luz, o qual a luz é refletida e absorvida, além de exemplificar apenas as cores do espectro visível, diferente dos fenômenos de luminescência. Estes, ao serem iluminados por espectros de luz específicas liberam uma	Total de Respostas: 16 alunos (57,1%)

	cor diferente da incidente, indicando a interação luz-elétron do salto quântico”.	
Compreensão Parcial: A resposta menciona fluorescência e/ou fosforescência, mas não inclui o conceito de salto quântico ou explicação é parcial.	Exemplo: “A teoria das cores explica como vemos as cores, mas não explica como a luz interage com as coisas já que ela também pode energizar as coisas”.	Total de Respostas: 9 alunos (32,1%)
Em Branco ou Não Sei: A resposta está em branco ou indica falta de conhecimento.		Total de Respostas: 3 alunos (10,7%)

Fonte: autor

A análise das respostas mostra que a maioria dos alunos (57,1%) demonstrou compreensão completa sobre a insuficiência da teoria RGB para explicar a fluorescência e fosforescência, incluindo o conceito de salto quântico. Porém, uma parte significativa (32,1%) apresentou compreensão parcial, mencionando apenas aspectos básicos sem detalhar o salto quântico. Outros 10,7% deixaram a resposta em branco ou indicaram não saber.

Análise das respostas e categorias para alternativa b):

Quadro 27 - Categorias e respostas para questão 6.4.11.b

Categoria	Respostas dos estudantes	Nº de Respostas
Compreensão Completa: A resposta inclui a explicação adequada do fenômeno de fluorescência ou fosforescência e a interação com luz ultravioleta, indicando ter conhecimento de ser um fenômeno quântico.	Exemplo: “As tintas neon emitem luz por conta da fluorescência a qual ocorre quando a luz UV, que é muito energética, é apontada para a tinta excitando os seus elétrons, Ao serem excitados, os elétrons transitam para uma camada mais externa e então, ao retornar para sua camada inicial, durante a volta o elétron emite energia em forma de luz visível”.	Total de Respostas: 16 alunos (57,1%)

Compreensão Parcial: A resposta aborda parcialmente o conceito de luz ultravioleta e sua interação com as tintas neon, mas deixa lacunas importantes.	Exemplo: “Neste efeito de fosforescência a luz UV interage com os elétrons dando energia a eles, causando um salto quântico”.	Total de Respostas: 9 alunos (32,1%)
Em Branco ou Não Sei: A resposta está em branco ou indica falta de conhecimento.		Total de Respostas: 3 alunos (10,7%)

Fonte: autor

A análise das respostas para o item b) revela que a maioria dos alunos (57,1%) demonstrou uma boa compreensão sobre o processo de emissão de luz pelas tintas neon sob luz ultravioleta, relacionando adequadamente o fenômeno com conceitos de transições eletrônicas e níveis de energia quânticos. No entanto, uma parte significativa (32,1%) apresentou respostas com imprecisões e lacunas, sugerindo compreensão parcial dos conceitos. Embora mais da metade dos alunos tenha mostrado entendimento da relação entre o fenômeno observado e princípios quânticos, ainda há uma parcela considerável que necessita de esclarecimento sobre esses conceitos para alcançar precisão nas explicações.

6.5 - ANÁLISE GERAL DOS DADOS

Os dados apresentados ao longo deste capítulo permitiram refletir com maior profundidade sobre o terceiro objetivo desta pesquisa: avaliar se houve progresso na compreensão, por parte dos estudantes, dos conceitos de Física Quântica abordados na sequência didática. De modo geral, os resultados indicam avanços relevantes na assimilação de conceitos e aplicações, como a dualidade onda-partícula, os saltos quânticos e a utilização dos espectros como ferramentas de análise.

O questionário inicial revelou que os estudantes não possuíam uma base conceitual sólida sobre a natureza da luz, ou apresentavam compreensões marcadas por equívocos e imprecisões. Após as atividades desenvolvidas,

observou-se que, no questionário final, grande parte dos alunos passou a tangenciar corretamente conceitos relacionados à natureza dual da luz. No entanto, mesmo com esse avanço, muitos ainda demonstraram dificuldades em citar experimentos que fundamentem cientificamente esses conceitos, indicando uma limitação na apropriação mais estruturada e crítica do conteúdo.

Outro dado relevante diz respeito ao conhecimento prévio sobre Física Quântica. Inicialmente, cerca de metade dos estudantes declarou não ter qualquer familiaridade com o tema. Ao final da sequência, mais da metade foi capaz de reconhecer e problematizar casos de "pseudociência quântica", com destaque para a identificação do uso indevido da expressão "salto quântico". Muitos estudantes, inclusive, apresentaram críticas a esse tipo de apropriação, o que evidencia um avanço na construção de uma postura mais crítica em relação ao discurso pseudocientífico.

Esse avanço não se restringiu ao ambiente escolar, pois alguns estudantes relataram que conversaram com familiares sobre os temas de Física Quântica discutidos em aula. Um relato, em especial, chamou a atenção: uma estudante afirmou ter evitado que sua avó consumisse um produto anunciado como "remédio quântico", após reconhecer que se tratava de um caso de pseudociência. Esses exemplos ilustram a potência da proposta didática na formação de um olhar mais atento e reflexivo para além da sala de aula.

Apesar desses progressos, permaneceram dificuldades conceituais recorrentes, sobretudo em relação à apropriação autônoma e contextualizada dos conteúdos. Esse cenário sugere uma familiaridade ainda limitada com os temas da Física Moderna e Contemporânea, o que pode estar relacionado, como discutido anteriormente, às condições em que esses conteúdos são tradicionalmente tratados no Ensino Médio.

Dessa forma, os dados analisados reforçam a relevância de propostas didáticas contextualizadas, que considerem as limitações do ambiente escolar e, ao mesmo tempo, promovam a aproximação dos estudantes com os conceitos da Física Quântica, de maneira crítica, significativa e fundamentada.

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sequência didática desenvolvida para o ensino de Física Quântica no Ensino Médio revelou-se uma ferramenta educativa potencial, principalmente por sua capacidade de adaptar conceitos complexos a uma linguagem acessível e engajadora para os estudantes. A estrutura do produto educacional, ao combinar explicações teóricas com atividades práticas e atividades lúdicas, proporcionou aos alunos uma introdução clara e gradual a conceitos básicos de Física Quântica - especialmente sobre o problema da natureza da luz. Esse formato, aliado ao uso de metodologias ativas, demonstrou-se eficaz em promover um aprendizado mais participativo, no qual os alunos puderam construir conhecimento de forma colaborativa e significativa.

O impacto da sequência didática também foi evidenciado pelo engajamento dos estudantes nas atividades, especialmente nas atividades práticas. A metodologia adotada, que inclui experimentos e discussões interativas, gerou maior interesse e curiosidade. O uso de experimentos visuais, como a atividade com as luzes e tintas neon, além do espectrógrafo, foi particularmente relevante, proporcionando evidências concretas e facilitando a visualização dos fenômenos físicos, o que contribuiu para consolidar o aprendizado.

Outro ponto relevante foi a eficácia da sequência didática na desconstrução de conceitos pseudocientíficos, um objetivo central deste trabalho. Com uma abordagem crítica e embasada, os alunos foram incentivados a identificar e questionar informações que não possuem fundamentação científica, especialmente em relação ao chamado “misticismo quântico”. Os debates acerca desse tópico renderam boas discussões, muito ricas e produtivas. Assim, de maneira geral, a sequência contribuiu para o letramento científico, capacitando os estudantes a avaliar informações e a desenvolver uma visão mais crítica sobre a ciência, além de levar a discussão sobre pseudociência para sala de aula.

Em síntese, os resultados obtidos sugerem que a sequência didática atingiu seus objetivos, não apenas facilitando o aprendizado de Física Quântica, mas também promovendo o engajamento e a formação de um pensamento científico crítico. A abordagem sequencial e prática deste produto educativo proporcionou um ambiente de aprendizado dinâmico e estimulante, que favoreceu a assimilação dos

conteúdos e fortaleceu a capacidade dos alunos de diferenciar ciência de pseudociência. A continuidade e o aprimoramento de abordagens semelhantes podem representar um avanço significativo na educação científica, especialmente em temas desafiadores e frequentemente alvo de interpretações equivocadas, como a FQ.

REFERÊNCIAS

ALMENARA, D. F.; TAVARES, D. K. P.; SOUZA, L. B.; OLIVEIRA, IGOR. S. C.; MERGULHÃO JUNIOR, C. Promovendo a análise das contribuições de grandes cientistas da Física Moderna utilizando metodologias ativas e recursos tecnológicos. **Revista Amazônica de Ensino de Física**, v.1, nº.1, nov. 2019.

AMARAL, Gustavo Rick; MARIN, Ronaldo. Do emaranhamento ao engabelamento quântico: uma abordagem semiótica das estratégias da pseudociência e das dificuldades da divulgação científica – Parte 1. **TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, jan./jun. 2022, p. 125-155. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.23925/1984-3585.2022i25p125-155>. Acesso em: 15 out. 2024.

AMARAL, Gustavo Rick; MARIN, Ronaldo. Do emaranhamento ao engabelamento quântico: uma abordagem semiótica das estratégias da pseudociência e das dificuldades da divulgação científica – Parte 2. **TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, n. 26, jul./dez. 2022, p. 121-143. Disponível em: <https://doi.org/10.23925/1984-3585.2022i26p105-127>. Acesso em: 15 out. 2024.

BARROS, Marcos Antônio; BARBOSA, Olavio Vinícios. A Física Moderna no Nordeste: uma análise da produção do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. **Revista Sustinere**, Mossoró, v. 12, n. 2, p. 1031-1045, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.12957/sustinere.2024.82514>. Acesso em: 09 mar. 2025.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.

BISCUOLA, Gualter José; DOCA, Ricardo Helou; VILLAS BÔAS, Newton. **Tópicos de Física**: Volume 3. 18. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

BUNGE, Mario. **Dicionário de Filosofia**. Trad. Gita K. Guinsburg. São Paulo: Perspectiva, 2002

BUSATTO, Cassiano Zolet; SILVA, Júpiter Cirílio da Roza; PANSERA JÚNIOR, Neclito; PÉREZ, Carlos Ariel Samudio. O ensino de Física Moderna e Contemporânea na educação básica: conteúdos trabalhados pelos docentes. **Revista CIATEC**, Passo Fundo, v. 10, n. 1, p. 104-115, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5335/ciatec.v10i1.8388>. Acesso em: 09 mar. 2025.

CASTILHO, C. M. C. de; NASCIMENTO, V. B.; SOARES, E. A.; ESPERIDIÃO, A. S. C.; MOTA, F. B.; CARVALHO, V. E. de. Difração de elétrons de baixa energia (LEED) e a determinação da estrutura atômica de superfícies ordenadas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 527-543, 2005. Disponível em: <https://www.sbfisica.org.br/rbef>. Acesso em: 21 out. 2024.

CAVALCANTI, Fábio; CARVALHO, Celso do Prado Ferraz de. O Novo Ensino Médio no Estado de São Paulo: a flexibilização como meio de instrumentalização e

adequação do currículo. **Revista Estudos Aplicados em Educação**, São Caetano do Sul, SP, v. 6, n. 12, p. 195-206, 2021.

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Tradução de João da Silva. São Paulo: Edgard Blücher, 1979.

FERREIRA, Marcello; SACERDOTE, Helena; STUDART, Nelson; SILVA FILHO, Olavo Leopoldino da. Análise de temas, teorias e métodos em dissertações e produtos educacionais no MNPEF. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 43, e20210322, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0322>. Acesso em: 09 mar. 2025.

GIL, Daniel; SOLBES, Jordi. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *Science & Education*, v. 2, p. 343–362, 1993.

GOMES, Sally Ramos; ZAMORA, Maria Helena. Negacionismo: definições, confusões epistêmicas e implicações éticas. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 30, e24008, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1516-731320240008>.

GOULART, Guilherme Salgueiro; LEONEL, André Ary. Revisão da literatura sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio sob a ótica da TAS: problemáticas emergentes a partir de eventos brasileiros de Ensino de Física. **Revista Dynamis**, Blumenau, v. 28, n. 1, p. 1-23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/211679.12.2-3>. Acesso em: 09 mar. 2025.

GRIFFITHS, David. J. **Mecânica Quântica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.

GRIFFITHS, David J. **Eletrodinâmica**. Tradução de Heloisa Coimbra de Souza. 3. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.

HEWITT, PAUL G. **Física conceitual**. Tradução de Trieste Freire Ricci. Revisão técnica de Maria Helena Gravina. Porto Alegre: Bookman, 2015.

HOERNIG, A. F.; MASSONI, N. T.; HADJIMICHEF, D. Física Quântica na Escola Básica: investigações para a promoção de uma Aprendizagem Conceitual, Histórica e Epistemológica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 43. mar. 2021.

LIMA, Donizete Franco. A importância da sequência didática como metodologia no ensino da disciplina de Física Moderna no Ensino Médio. **Revista Triângulo**, Uberaba, v. 11, n. 1, p. 151-162, jan./abr. 2018. Disponível em: <https://seer.uftm.edu.br/revistaeletronica/index.php/revistatriangulo/article/view/2798>. Acesso em: 09 mar. 2025.

MARTINS, Roberto de Andrade; ROSA, Pedro Sérgio. **História da teoria quântica**. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

NASA/IPAC. **Cool Cosmos**: Your infrared guide to the world and the Universe beyond. Disponível em: <https://coolcosmos.ipac.caltech.edu/>. Acesso em: 23 maio 2024.

NEWTON, ISAAC. **Óptica**: Sir Isaac Newton. Tradução, introdução e notas de André Koch Torres Assis São Paulo: Universidade de São Paulo, 2017.

PEREIRA, Zoraide Dangremon de Almeida; ERTHAL, João Paulo Casaro. Temas e referenciais presentes nas dissertações do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física. **REnCiMa**, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 1-17, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26843/rencima.v13n3a04>. Acesso em: 9 mar. 2025.

PESSOA JUNIOR, OSVALDO. O fenômeno cultural do misticismo quântico. **Teoria quântica**: estudos históricos e implicações culturais. Tradução. Campina Grande: EdUEPB, 2011. Acesso em: 20 out. 2022.

PESSOA JUNIOR, OSVALDO. **Conceitos de Física quântica**: Vol. 1. 4. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2019.

PIGOZZO, Daniel; NASCIMENTO, Matheus Monteiro; LIMA, Nathan Willig. Uma revisão de literatura da área de educação em ciências sobre o fenômeno cultural do misticismo quântico. **ALEXANDRIA**: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia, Florianópolis, v. 15, n. 1, p. 63-85, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/1982-5153.2022.e78755>. Acesso em: 15 out. 2024.

PINTO, A. C.; ZANETIC J. É possível levar a Física quântica para o Ensino Médio?. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, SC, Brasil, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999.

SAITO, Márcia Tiemi. **A gênese e o desenvolvimento da relação entre física quântica e misticismo e suas contribuições para o ensino de ciências**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81131/tde-10062019-121225/>. Acesso em: 05 mar. 2025.

SANTOS, Carlos Alberto dos. Millikan e a questão do potencial de contato no experimento do efeito fotoelétrico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 40, n. 3, e3602, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0321>. Acesso em: 5 mar. 2025

SÃO PAULO. Secretaria da Educação do Estado de São Paulo. União dos Dirigentes Municipais de Educação do Estado de São Paulo. **Currículo Paulista** (Versão 1). São Paulo: SEE-SP/UNDIME-SP, 2018. Disponível em <https://efape.educacao.sp.gov.br/curriculopaulista/>. (Acesso em 29/06/2022).

SAITO, Marcia Tiemi. O fenômeno cultural do misticismo quântico: possibilidades e perspectivas de investigação. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, Passo Fundo, v. 4, ed. especial, p. 1101-1129, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5335/rbecm.v4i3.12903>. Acesso em: 09 mar. 2025.

SILVA, A. C.; ALMEIDA, M. J. P. M. Física Quântica no Ensino Médio: O que dizem as pesquisas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 624-652, dez. 2011.

SILVEIRA, Luciana Martha. **Introdução à teoria da cor**. 2. ed. Curitiba: Editora UTFPR, 2015.

SOUZA, Rafaelle da Silva; REIS, Gabriel Adriano de Jesus; HORA, Gustavo Mota Bispo da. O estado da arte das pesquisas relacionadas à divulgação científica sobre a Física Quântica entre os anos 2010 e 2022. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, e20240052, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0052>. Acesso em: 9 jul. 2024.

STUDART, Nelson. A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Carlos, v. 22, n. 4, p. 523, dez. 2000.

VILAS BOAS, Newton; DOCA, Ricardo Helou; BISCUOLA, Gualter José. **Tópicos de Física** - Vol. 2 - Termologia, Ondulatória e Óptica. 19. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

VIVIANI, Vadim R.; BECHARA, Etelvino J. H. Um Prêmio Nobel por uma Proteína Brilhante. **Química Nova**, n. 30, novembro 2008. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/27361101/quimica-nova-na-escola-nov-2008/7>. Acesso em: 23/05/2024.

ZABALA, Anteni **A prática educativa: como ensinar**. Porto Alegre: Artes Médicas Sul Ltda., 1998.

APÊNDICE



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufisica** Sorocaba



PRODUTO EDUCACIONAL

FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: O UNIVERSO ALÉM DO VISÍVEL

RAUL PINHEIRO DA SILVA

Sorocaba - SP
Abril de 2025

FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: O UNIVERSO ALÉM DO VISÍVEL

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO, desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 42 – UFSCAR / CAMPUS SOROCABA-SP, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Fernanda Keila Marinho da Silva
Co-Orientador: Prof. Dr. Tersio Guilherme de Souza Cruz

Sorocaba - SP
Abril de 2025

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001. Assim, agradeço à CAPES pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o meu período de formação.

Agradeço à minha família e amigos, que estiveram ao meu lado com amor, apoio e compreensão em todos os momentos, tornando essa jornada possível. A vocês, que sempre acreditaram e me incentivaram, sou eternamente grato.

Aos meus orientadores, Profa. Dra. Fernanda Keila Marinho da Silva e Prof. Dr. Tersio Guilherme de Souza Cruz, expresso minha gratidão pelo suporte acadêmico e pelas orientações ao longo de todo o processo, que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Aos colegas de turma, agradeço pela parceria e pelas trocas que tornaram o percurso mais leve e colaborativo.

*“Quanta do latim
Plural de quantum
Quando quase não há
Quantidade que se medir
Qualidade que se expressar”*

(“Quanta”, Gilberto Gil)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de produção dos estudantes.....	163
Figura 2 - Os campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética plana...	167
Figura 3 - Esquema do espectro eletromagnético.....	167
Figura 4 - Demonstração utilizando laser verde e borrifador de água.....	170
Figura 5 - Refletor RGB e controle remoto utilizados na atividade experimental.....	171
Figura 6 - Fonte de luz UV utilizada na atividade experimental.....	172
Figura 7 - Tintas Neon para maquiagem (esq.) e fotos da aplicação (dir.).....	173
Figura 8 - Esquema original proposto para o experimento de Newton com os prismas.....	177
Figura 9 - Na figura, as duas coroas são o mesmo objeto visto a 90 metros de distância pelo telescópio refletor de Newton (fig.2) e por um telescópio refrator (fig.3) como 61 cm de comprimento (que aumentava 14 vezes).....	177
Figura 10: (a) A bola vermelha vista sob luz branca. (b) A bola vermelha vista sob luz vermelha. (c) A bola vermelha vista sob luz verde.....	178
Figura 11 - Esquemático do olho humano.....	180
Figura 12: A mistura de luzes coloridas. Quando três projetores emitem luzes vermelha, verde e azul sobre uma tela branca, as áreas de superposição produzem diferentes cores. O branco é gerado onde as três luzes se sobrepõem.....	181
Figura 13: Experimento realizado utilizando 3 lâmpadas RGB.....	182
Figura 14- Espectro coletado das principais cores de um monitor RGB e do Branco...	182
Figura 15: Esquema do processo de excitação e relaxação do elétron.....	183
Figura 16- Esquemático representando o processo da Fluorescência.....	184
Figura 17- Visualização de tumor marcado com uma variante vermelha da GFP: uma aplicação biofotônica de proteínas bioluminescentes como GFP e luciferases.....	185
Figura 18 - Imagens apresentadas aos estudantes: ferro incandescente e vagalume..	187
Figura 19 - Simulador sobre espectro de Corpo Negro utilizando durante a aula...	188
Figura 20 - Representação esquemática de um corpo negro.....	191
Figura 21 - Gráfico histórico da Intensidade espectral como função do comprimento de onda.....	192
Figura 22 - Gráfico dos pontos experimentais (pontos vermelhos) e da previsão teórica da Física Clássica - Rayleigh e Jeans (linha sólida azul).....	193
Figura 23 - Resultado teórico de Planck (curva contínua) e curva experimental de radiação do corpo negro (pontos).....	195
Figura 24 - Modelo de camadas do átomo de Bohr representando os processos de absorção (esq.) e emissão (dir.).....	196
Figura 25 - (esq.) Elétron absorvendo um quantum de Energia h.f e mudando para um estado mais externo. (dir.) Elétron emite um quantum de energia h.f ao retornar para seu estado.....	197
Figura 26 - Exemplo de pseudociência quântica.....	199

Figura 27 - Três dos possíveis saltos quânticos de um elétron no átomo de hidrogênio, evidenciando a relação com os espectros.....	205
Figura 28 - Molde para construção do espectrógrafo.....	206
Figura 29 - (esq.) Espectrógrafo construído conforme o modelo fornecido. (dir.) Espectro da luz branca emitida por uma lâmpada fluorescente.....	206
Figura 30 - Espectros de diferentes fontes.....	209
Figura 31 - Um espectroscópio simples. As imagens da fenda iluminada são projetadas em uma tela, criando um padrão de linhas. O espectro resultante é específico para a luz que ilumina a fenda.....	209
Figura 32 - As três melhores medidas do espectro solar, realizadas às 16h do dia 31/10/2018. As linhas em vermelho são os ajustes utilizando o LogNormal no Origin..	210
Figura 33 - Um arranjo experimental para demonstrar o espectro de absorção de um gás.....	211
Figura 34 - Em preto: espectro do Sol (16h), em vermelho: espectro do CO ₂ , em azul: espectro de H ₂ O, com foque na região do visível.....	212
Figura 35 - Espectros em diferentes temperaturas.....	213
Figura 36 - (esq.) Foto tirada da lâmpada de Argônio e Mercúrio submetida a 5 kV (dir.) Foto tirada da lâmpada de Hidrogênio submetida a 5 kV.....	215
Figura 37 - Níveis de energia do Hélio e Neônio. As principais transições são indicadas por setas duplas. Note que o estado fundamental está em uma energia muito menor.....	216
Figura 38 - Simulador PHET para o efeito fotoelétrico.....	219
Figura 39 - Um esquema experimental usado para observar e medir o efeito fotoelétrico.....	221
Figura 40 - Figuras de difração para (a) feixe incidente de raios-X, enquanto em (b) temos o feixe composto por elétrons.....	226
Figura 41 - Esquema simplificado para ilustrar as órbitas eletrônicas de um átomo que possuem raios discretos, porque as suas circunferências são números múltiplos inteiros do comprimento de onda do elétron.....	228

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MNPEF - Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

SBF - Sociedade Brasileira de Física

PROFIS-So - Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física/campus Sorocaba

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

EM - Ensino Médio

BNCC - Base Nacional Comum Curricular

FQ - Física Quântica

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	149
1 - INTRODUÇÃO.....	150
2 - ESTRUTURA DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	152
MÓDULO 1 - Introdução à Física Quântica e à Natureza da Luz.....	153
MÓDULO 2 - Conceitos Fundamentais e a Quantização da Energia.....	154
MÓDULO 3 - Espectroscopia, salto quântico e aplicações científicas.....	155
MÓDULO 4 - Dualidade onda-partícula, equação de De Broglie.....	156
3 - SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	157
AULA #1 - Apresentação da Sequência Didática e Levantamento de Conhecimentos Prévios.....	158
AULA #2 - Introdução à Natureza da Luz e Pontilhismo.....	161
AULA #3 - Luz, Cores e Fluorescência.....	170
AULA #4 - Fluorescência, Quantização da Energia e Salto Quântico.....	187
AULA #5 - O Uso do "Salto Quântico" na Pseudociência.....	199
AULA #6 - Construção e Uso de um Espectrógrafo Caseiro.....	204
AULA #7 - Discussão dos Espectros e Aplicações na Ciência.....	215
AULA #8 - Efeito Fotoelétrico.....	219
AULA #9 - Limites da Teoria Quântica e Dualidade Onda-Partícula.....	225
AULA #10 - Reflexão e Questionário Final.....	232
4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	240
REFERÊNCIAS.....	241
APÊNDICE.....	243

APRESENTAÇÃO

Este material é um Produto Educacional desenvolvido no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus Sorocaba. Ele consiste em uma sequência didática estruturada, voltada para professores do Ensino Médio que desejam explorar conceitos fundamentais da Física Quântica de forma acessível, contextualizada e crítica. O objetivo principal é oferecer suporte teórico e prático, auxiliando educadores na construção de aulas mais dinâmicas e eficazes, promovendo o pensamento científico e o combate a interpretações pseudocientíficas que frequentemente distorcem os princípios dessa área da Física.

A sequência didática está organizada em quatro módulos interligados, abrangendo desde uma introdução histórica e conceitual sobre a natureza da luz e os fenômenos luminosos até atividades experimentais, discussões críticas e uma contextualização sociocultural para desmistificar conceitos pseudocientíficos frequentemente associados à Física Quântica. Além disso, o material busca desenvolver competências essenciais para o letramento científico, capacitando os estudantes a diferenciar ciência e pseudociência, compreendendo as reais aplicações da Física Quântica no mundo contemporâneo.

Este Produto Educacional foi elaborado com base na Base Nacional Comum Curricular (BNCC), priorizando a contextualização dos conteúdos e a adoção de estratégias pedagógicas ativas, como experimentação, investigação e debate. Espera-se que ele contribua para a modernização do ensino de Física no Ensino Médio, tornando os conteúdos da Física Quântica mais acessíveis e significativos para os estudantes, fortalecendo, assim, a educação científica como um pilar da formação cidadã e crítica.

Este material foi desenvolvido para ser utilizado de forma independente e adaptável a diferentes contextos escolares, permitindo que outros professores interessados na proposta possam aplicá-la sem necessidade de consulta à dissertação que originou seu desenvolvimento. Mais do que um recurso didático, este Produto Educacional é um convite para que professores explorem a Física Quântica em sala de aula de forma inovadora e significativa.

1 - INTRODUÇÃO

Este material foi desenvolvido para apoiar professores do Ensino Médio na abordagem de conceitos fundamentais da Física Quântica de maneira acessível, contextualizada e crítica. Ele apresenta uma sequência didática estruturada, que pode ser utilizada integralmente ou adaptada conforme a necessidade da turma e do professor. O objetivo é proporcionar estratégias pedagógicas ativas, promovendo a participação dos estudantes e incentivando o pensamento crítico, o letramento científico e a distinção entre ciência e pseudociência.

A sequência didática está organizada em quatro módulos interconectados, que abordam desde conceitos introdutórios até atividades experimentais e discussões socioculturais. Cada módulo apresenta objetivos específicos, sugestões de atividades práticas e orientações para o professor conduzir as discussões em sala de aula. Além disso, os estudantes são incentivados a explorar os fenômenos físicos, refletir sobre os resultados obtidos e estabelecer relações com aplicações tecnológicas e desafios contemporâneos.

O material também busca preencher uma lacuna existente no ensino de Física Moderna, uma vez que há pouca disponibilidade de materiais didáticos acessíveis para professores do Ensino Médio. A proposta se fundamenta nas diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), alinhando-se aos eixos de contextualização e experimentação, de modo a tornar o ensino da Física Quântica mais significativo e conectado ao mundo real.

Metodologicamente, este material se baseia na abordagem construtivista, fundamentada em Zabala (1998), que enfatiza o papel das sequências didáticas como estruturas organizadoras do ensino/aprendizagem. Para Zabala, o aprendizado ocorre de forma mais eficaz quando as atividades são estruturadas de maneira progressiva, permitindo que os estudantes relacionem novos conceitos com conhecimentos prévios. Essa organização didática favorece a compreensão da Física Quântica, um campo que tradicionalmente enfrenta dificuldades de ensino devido ao seu caráter abstrato.

Além disso, um aspecto central desta proposta é o combate à pseudociência e ao misticismo quântico, fenômenos que têm ganhado popularidade na sociedade e

frequentemente distorcem conceitos científicos. Termos como "salto quântico", "cura quântica" e "energia quântica" são amplamente utilizados em contextos pseudocientíficos, sem fundamentação teórica válida. Para enfrentar esse problema, a sequência didática incorpora momentos de análise crítica e investigação, incentivando os estudantes a diferenciarem ciência e pseudociência por meio da pesquisa, experimentação e discussão fundamentada.

Ao longo desta sequência didática, os professores encontrarão orientações detalhadas para a aplicação de cada atividade, bem como sugestões para avaliações formativas e discussões reflexivas. Espera-se que este material contribua para o ensino de Física Quântica no Ensino Médio, desmistificando pseudociências e fortalecendo a compreensão científica dos estudantes.

Nesse sentido, a sequência didática proposta contempla uma seleção de marcos fundamentais da história da Física Quântica, conceitualmente articulados. Iniciando pelas contribuições de Isaac Newton para a compreensão da natureza da luz, os estudantes são apresentados ao desenvolvimento da teoria ondulatória por James Clerk Maxwell, ao surgimento da quantização da energia com Planck (1900) e aos trabalhos de Einstein em 1905. Em seguida, são introduzidos o modelo atômico de Bohr (1913) e o conceito de dualidade onda-partícula proposto por Louis de Broglie (1924). Essa trajetória histórica favorece a construção progressiva do conhecimento, permitindo que os estudantes compreendam os limites da Física Clássica e o surgimento dos conceitos quânticos, alinhando-se ao objetivo central da proposta de promover um ensino mais crítico e contextualizado da Física Quântica no Ensino Médio. Um esquemático com os principais nomes e datas envolvidos nesse percurso pode ser visualizado na figura a seguir, servindo como apoio para a organização cronológica dos conteúdos trabalhados.

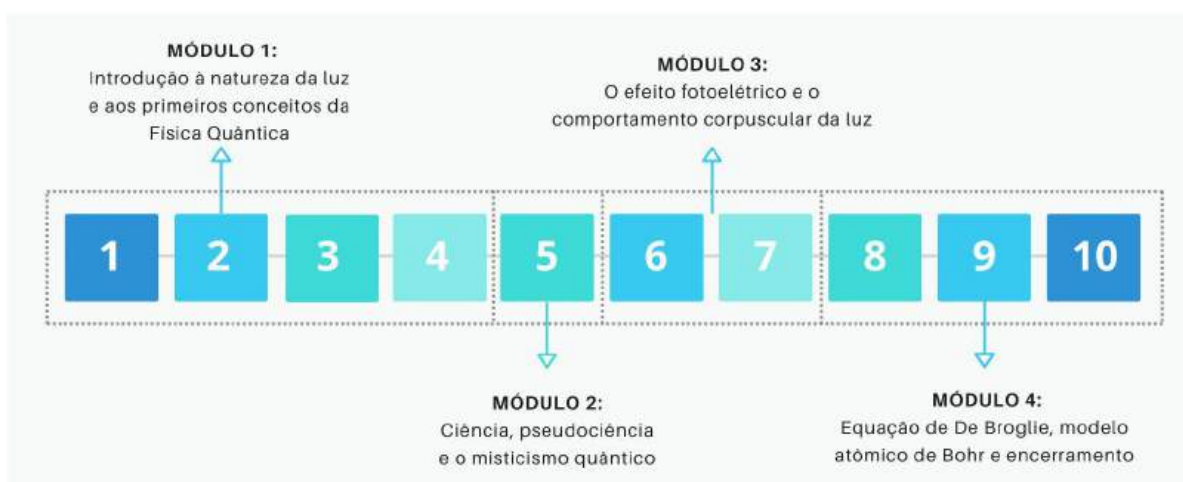
1665	1862	1900	1905	1913	1924
Contribuições de Isaac Newton para a compreensão da Natureza da Luz	James Clerk Maxwell e a Teoria Ondulatória para luz	Planck e o início da Quantização da energia	Einstein publica seus 4 artigos famosos	Novo modelo para a Matéria de Bohr	Ondas de matéria de de Broglie

2 - ESTRUTURA DO PRODUTO EDUCACIONAL

A sequência didática foi organizada em quatro módulos interconectados, que seguem uma progressão lógica para a construção do conhecimento em Física Quântica. Cada módulo aborda um conjunto de conceitos essenciais, partindo da introdução à natureza da luz até discussões avançadas sobre a dualidade onda-partícula e a quantização da energia. A estrutura foi planejada para que os estudantes possam relacionar os conteúdos teóricos com atividades experimentais, promovendo a investigação científica e a aprendizagem significativa.

A abordagem adotada busca equilibrar contextualização histórica, experimentação e reflexão crítica, permitindo que os estudantes compreendam não apenas os fundamentos da Física Quântica, mas também sua importância tecnológica e implicações científicas contemporâneas. Além disso, um dos focos centrais da sequência é o combate à pseudociência, explorando como conceitos quânticos são frequentemente distorcidos na mídia e no senso comum. Para isso, atividades específicas foram incluídas para que os estudantes desenvolvam habilidades de análise crítica e aprendam a diferenciar ciência de pseudociência.

Cada módulo contém objetivos claros, um conjunto de aulas interligadas e sugestões de experimentação e discussão, fornecendo um guia completo para o professor. A seguir, são apresentados os módulos da sequência didática e suas respectivas características.



MÓDULO 1

Introdução à Física Quântica e à Natureza da Luz

Objetivos: Introduzir os conceitos fundamentais da Física Quântica a partir de uma abordagem histórica e conceitual da natureza da luz, explorando suas interações com a matéria e preparando os estudantes para a compreensão de fenômenos quânticos em experimentos posteriores.

Aulas incluídas:

- Aula #1 – Apresentação da sequência didática e levantamento de conhecimentos prévios sobre luz, ciência e pseudociência.
- Aula #2 – Estudo da natureza da luz e da teoria das cores, com base nas contribuições de Newton e Goethe.
- Aula #3 – Realização de experimento com fluorescência e diferentes fontes de luz.
- Aula #4 – Discussão dos resultados experimentais e introdução ao conceito de salto quântico e estrutura atômica com base no modelo de Bohr.

Conteúdos trabalhados:

- História da luz: modelos clássicos e transição para o pensamento quântico.
- Natureza dual da luz: corpuscular e ondulatória.
- Conceitos de fluorescência e salto quântico.
- Primeiros elementos da estrutura atômica na física moderna.

Destaques:

- Aproximação entre arte e ciência: uso do pontilhismo como analogia à quantização.
 - Experimentos com luz negra, pigmentos fluorescentes e observações visuais como ferramenta investigativa.
 - Discussão contextualizada do salto quântico como transição entre níveis de energia.
-

MÓDULO 2

Conceitos Fundamentais e a Quantização da Energia

Objetivos: Promover uma reflexão crítica sobre a apropriação indevida de conceitos da Física Quântica por discursos pseudocientíficos, diferenciando o conhecimento científico validado das interpretações equivocadas amplamente difundidas na mídia, na publicidade e em contextos místicos. O bloco busca desenvolver nos estudantes a capacidade de análise e argumentação fundamentada, contribuindo para o letramento científico e a formação cidadã.

Aulas incluídas:

- Aula #5 – Discussão sobre pseudociência e o uso indevido de termos da Física Quântica no senso comum, na cultura pop e em discursos de caráter não científico.

Conteúdos trabalhados:

- Diferença entre ciência e pseudociência.
- Conceito de salto quântico no contexto da física moderna.
- Apropriações equivocadas da Física Quântica na mídia, em propagandas e em discursos místicos.
- O papel da educação científica no combate à desinformação.

Destaques:

- Análise crítica de vídeos e propagandas reais que utilizam indevidamente termos como “energia quântica” e “cura quântica”.
 - Relatos de estudantes sobre experiências pessoais com pseudociência, incluindo situações familiares.
 - Uso de estratégias interativas, como atividades de análise textual e debates orientados, para desconstrução de argumentos pseudocientíficos.
 - Reflexão sobre o impacto social da desinformação científica e o papel do ensino de Física na formação de leitores críticos.
-

MÓDULO 3

Espectroscopia, salto quântico e aplicações científicas

Objetivos: Explorar os conceitos de espectroscopia, emissão e absorção de luz, aprofundando a compreensão do salto quântico e sua relação com a estrutura atômica. Por meio da construção e uso de um espectrógrafo artesanal, os estudantes desenvolvem habilidades experimentais e interpretativas, relacionando os dados obtidos com fenômenos físicos e aplicações científicas, especialmente na astrofísica.

Aulas incluídas:

- Aula #6 – Construção de um espectrógrafo caseiro e introdução ao estudo dos espectros.
- Aula #7 – Análise e interpretação dos espectros de diferentes fontes luminosas (lâmpadas, LED, espectro solar), discutindo sua relação com a quantização da energia e a composição dos elementos.

Conteúdos trabalhados:

- Espectros de emissão e absorção.
- Salto quântico e transições eletrônicas em átomos excitados.
- Espectroscopia como ferramenta científica e suas aplicações tecnológicas e astrofísicas.

Destaques:

- Atividade prática de construção de espectrógrafo com materiais acessíveis.
 - Análise de espectros reais coletados pelo professor com apoio de espectrógrafo no IFGW/UNICAMP.
 - Interpretação das linhas de absorção no espectro solar, incluindo a identificação de elementos como CO_2 e H_2O .
 - Discussão sobre o uso da espectroscopia na astronomia, na identificação de elementos químicos e na estimativa da temperatura de estrelas por meio da Lei de Wien.
-

MÓDULO 4

Dualidade onda-partícula, equação de De Broglie e encerramento

Objetivos: Consolidar os conceitos fundamentais da Física Quântica discutidos ao longo da sequência didática, com foco na dualidade onda-partícula, no efeito fotoelétrico e na equação de De Broglie. Ao final, promove-se uma avaliação global da aprendizagem dos estudantes e uma reflexão crítica sobre os limites da Física Clássica e os avanços proporcionados pela abordagem quântica.

Aulas incluídas:

- Aula #8 – Estudo do efeito fotoelétrico, a partir do questionamento espontâneo de um estudante. Apresentação da explicação de Einstein e uso do simulador PHET.
- Aula #9 – Introdução à dualidade onda-partícula e aplicação da equação de De Broglie a diferentes sistemas físicos.
- Aula #10 – Revisão geral dos conteúdos trabalhados, aplicação do questionário final e discussão sobre os impactos sociais da Física Quântica.

Conteúdos trabalhados:

- O efeito fotoelétrico como evidência do comportamento corpuscular da luz.
- A equação de De Broglie e os limites de aplicação da mecânica quântica.
- O Princípio da Complementaridade de Bohr.

Destaques:

- Utilização do simulador PHET para investigar o efeito fotoelétrico de forma interativa.
 - Atividades de cálculo envolvendo o comprimento de onda de De Broglie, comparando sistemas microscópicos e macroscópicos.
 - Discussão crítica sobre a natureza dual da luz e da matéria.
 - Aplicação de questionário final como instrumento avaliativo e de metacognição, incluindo relatos espontâneos dos estudantes sobre o contato com pseudociência no cotidiano.
-

3 - SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A sequência didática foi estruturada em dez aulas interligadas, cada uma planejada para introduzir, aprofundar e consolidar os conceitos fundamentais da Física Quântica. As aulas combinam exposição teórica, atividades experimentais, discussões críticas e reflexões investigativas, proporcionando uma abordagem equilibrada entre teoria e prática. Além disso, a proposta incentiva os estudantes a analisarem fenômenos físicos observáveis, realizarem experimentos e diferenciarem ciência de pseudociência, promovendo o desenvolvimento do pensamento crítico e do letramento científico. A seguir, são apresentadas as aulas da sequência, com seus respectivos objetivos, estratégias e orientações para aplicação em sala de aula. As aulas foram planejadas para encontros de 50 minutos e podem ser ajustadas de acordo com a realidade escolar onde o projeto será aplicado.

AULA #1

Apresentação da Sequência Didática e Levantamento de Conhecimentos Prévios



Objetivos da Aula:

- Apresentar a proposta da sequência didática e fornecer uma visão geral da Física Quântica e suas aplicações.
- Levantar os conhecimentos prévios dos estudantes sobre conceitos fundamentais.
- Estimular reflexões iniciais sobre a presença da Física Quântica no cotidiano.

Recursos necessários:

- Computadores ou celulares com acesso à internet (para preenchimento do questionário online via Microsoft Forms);
- Projetor ou TV multimídia (para apresentação de slides introdutórios);
- Material impresso [opcional](alternativa para estudantes que não puderem acessar o formulário digital).

Introdução (10 minutos)

Instruções:

1. Cumprimente os estudantes e na sequência projete os slides, fazendo uma breve apresentação da sequência didática, explicando que o curso abordará conceitos fundamentais da Física Quântica.

2. Pergunte aos estudantes se já ouviram falar sobre Física Quântica e registre algumas respostas no quadro. A partir das respostas, pergunte o contexto das respostas dos estudantes.
3. Relacione a Física Quântica a exemplos do dia a dia (ex.: telas de celular, lasers, ressonância magnética).
4. Estimule os estudantes a expressarem o que sabem, sem medo de errar.
5. Explique que será aplicado um questionário inicial para levantar os conhecimentos prévios sobre o tema.

Preenchimento do Questionário Inicial (30 minutos)

Instruções:

1. Solicite que os estudantes acessem o formulário online via Microsoft Forms.
2. Caso algum aluno tenha dificuldades técnicas, disponibilize uma versão impressa.
3. Dê 30 minutos para que todos respondam as questões com calma.
4. Após o preenchimento, explique que as respostas serão utilizadas para direcionar as próximas aulas.

 Questionário Inicial:

- O que é a luz? O que você sabe sobre a natureza da luz?
- A cor é uma propriedade do objeto ou depende da luz? Justifique.
- Já ouviu falar em “salto quântico”? O que você sabe sobre o tema?
- Já ouviu falar em “Física Quântica”? O que você sabe sobre o tema?
- Qual o modelo atômico mais atual que você conhece? Explique resumidamente.

Discussão Final e Reflexão (10 minutos)

Instruções:

1. Pergunte aos estudantes como foi a experiência de responder às questões.
 2. Selecione algumas respostas (de forma anônima) e apresente no quadro, dialogue com as respostas dos estudantes.
-

3. Explique que as aulas seguintes irão explorar mais profundamente esses conceitos.

 Sugestões para aplicação da atividade:

- Não corrija imediatamente as respostas; o objetivo aqui é mapear o conhecimento prévio, não avaliar acertos e erros.
- Reforce que não há respostas erradas, apenas percepções iniciais que serão trabalhadas ao longo da sequência didática.
- Encerre a aula incentivando a curiosidade: “Na próxima aula, veremos como a luz pode se comportar como onda ou partícula. Como isso é possível?”

Resumo da Aula:

 Conteúdos abordados:

- Conceitual: Visão geral da Física Quântica e suas aplicações.
- Procedimental: Preenchimento do questionário inicial.
- Atitudinal: Reflexão sobre a Física Quântica no cotidiano e sua importância científica.

 Estratégias didáticas:

- Introdução expositiva utilizando slides.
- Diálogo interativo com os estudantes.
- Aplicação de um questionário online.

AULA #2

Introdução à Natureza da Luz e Pontilhismo



Objetivos da Aula:

- Introduzir a natureza da luz (ondulatória) e sua relação com a teoria das cores.
- Explorar como a Física Clássica descreve a luz.
- Relacionar arte e ciência por meio da técnica do pontilhismo, estabelecendo uma analogia com a granularidade da matéria e da energia na Física Quântica.
- Estimular o trabalho colaborativo e o pensamento crítico por meio da produção artística.

Recursos necessários:

- Projetor ou TV multimídia para apresentação de slides.
- Imagens e vídeos sobre a teoria das cores e pontilhismo.
- Folhas de papel branco A4 para produção dos desenhos.
- Lápis, canetas coloridas ou tintas guache para a atividade prática.

Introdução à Aula – “O que é a luz?” (10 minutos)

Instruções:

1. Inicie a aula com a pergunta: "O que é a luz?" e peça que os estudantes respondam rapidamente. Registre algumas respostas no quadro.
2. Apresente a teoria ondulatória como uma possível para essa resposta, trazendo algumas evidências históricas.

3. Conduza uma breve discussão sobre a teoria das cores dos objetos, perguntando:
 - A cor é uma propriedade do objeto ou depende da luz?
 - Como enxergamos as cores no cotidiano?

Pontilhismo e Granularidade da matéria (15 minutos)

Instruções:

1. Projete algumas imagens diferentes e pergunte: "Essa pintura foi feita com traços contínuos ou pontos?". Alterne as obras, misturando obras clássicas do pontilhismo com outros movimentos da mesma época histórica.
2. Pergunte aos estudantes como poderiam diferenciar um desenho feito com pontilhismo de um desenho tradicional.
3. Associe essa ideia à necessidade de "dar zoom" para observar detalhes invisíveis a olho nu, criando um paralelo com a escala quântica.
4. Explique o conceito de pontilhismo, destacando como pequenos pontos de tinta criam a ilusão de formas e cores quando vistos à distância.
5. Relacione essa técnica artística com a granularidade da matéria e da energia, que será um conceito central na Física Quântica.

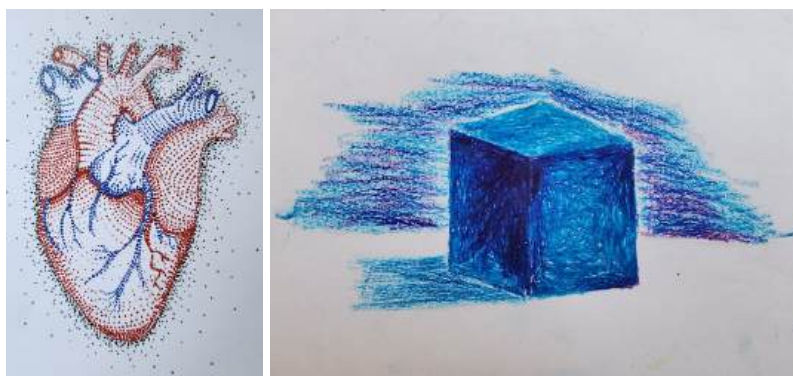
Produção dos Desenhos – Representando a Matéria e a Realidade (25 minutos)

Instruções:

1. Organize os estudantes em pares e entregue folhas de papel e lápis (canetinha, tintas diversas). Os estudantes podem utilizar diferentes técnicas de desenho (pintura, recorte, etc).
2. Apresente a situação-problema para estimular a criatividade e dar corpo a proposta:
 - "Vocês são artistas e recebem a seguinte missão: precisam representar, em forma de desenho, suas respostas para as perguntas:
 1. O que é a matéria?
 2. O que é a realidade?"
3. Cada dupla deve criar dois desenhos:
 - Um desenho apenas utilizando traço contínuo.

- Outro utilizando a técnica do pontilhismo.
- 4. Incentive os estudantes a serem criativos e expressivos, sem a preocupação de desenhar "perfeitamente". Recomende a utilização de cores variadas pois isso deixará a atividade prática futura mais interessante.
- 5. Circule pela sala, ajudando os estudantes a refletirem sobre como diferentes formas de representação podem modificar nossa percepção da realidade.

Figura 1 - Exemplos de produção dos estudantes



Fonte: Autor

Sugestões para aplicação da atividade:

- Alguns estudantes podem achar difícil criar um desenho abstrato. Estimule-os a pensar em padrões naturais (como texturas de plantas, água, nuvens) ou conceitos científicos (átomos, partículas).
- Reforce que não há respostas certas ou erradas; o importante é o processo de reflexão.
- Se não houver tempo para finalizar os desenhos em sala, peça que os estudantes os completem em casa e tragam na próxima aula.

Resumo da Aula

Conteúdos abordados:

- Conceitual: Teoria das cores de Newton, reflexão da luz, introdução à natureza da luz.
- Procedimental: Produção dos desenhos (contínuo e pontilhado).
- Atitudinal: Trabalho em pares, criatividade na representação da realidade.

 Estratégias didáticas:

- Introdução expositiva utilizando slides e imagens.
- Discussão guiada sobre teoria das cores e pontilhismo.
- Produção artística dos estudantes em pares.

MATERIAL DE REFERÊNCIA PARA USO DOCENTE:**Breve contextualização histórica sobre o início da Física Quântica**

Segundo Pessoa Jr. (2019), se pudéssemos resumir qual é a essência da Física Quântica em relação à Física Clássica, seria o problema da dualidade onda-partícula. Ainda segundo Pessoa Jr. (2019, p. 1), “a Teoria Quântica atribui para qualquer partícula individual aspectos ondulatórios e, para qualquer forma de radiação, aspectos corpusculares”. Partindo dessa visão, optamos por montar a sequência didática com o foco no problema da natureza da luz.

O próprio Planck, em 1919, destacou em uma palestra que a natureza da luz era um dos principais e mais desafiadores problemas da Teoria Quântica (Martins, Rosa, 2014). Para abordar este tema, faremos um breve histórico sobre o início da Física Quântica, iniciando pela contextualização da Física no final do século XIX e início do século XX, começando com as contribuições de Maxwell e culminando com a emergência da Quântica a partir do problema conhecido como "catástrofe do ultravioleta", que deu origem aos desdobramentos iniciais da teoria quântica.

Nos tópicos seguintes, abordaremos dois fenômenos fundamentais que, na virada do século XIX para o século XX, marcaram o início da Física Moderna: a Radiação do Corpo Negro e o Efeito Fotoelétrico. O primeiro, explicado por Max Planck, introduziu o conceito de quantização da energia e é considerado um marco histórico para o surgimento da Física Quântica. Já o segundo, elucidado por Albert Einstein, consolidou a natureza corpuscular da luz. Ambos os fenômenos foram decisivos para o desenvolvimento da Física Quântica, inaugurando uma nova compreensão sobre a interação entre matéria e radiação.

Segundo Martins e Rosa (2014), no final do século XIX, a Física parecia estar completamente resolvida, com muitos cientistas acreditando que os problemas futuros seriam apenas aplicações dos fundamentos já estabelecidos. Durante uma palestra em 1900, Lord Kelvin (1824-1907) sugeriu que a Física estava esgotada,

descrevendo-a como "um céu azul, com algumas nuvens no horizonte." Com regras bem definidas para o comportamento da matéria e das ondas, acreditava-se que aos físicos restava apenas aplicá-las e melhorar a precisão dos experimentos. Essas "nuvens de Kelvin" eram fatos experimentais ainda não explicados, incluindo o experimento de Michelson e Morley e o problema do Corpo Negro. Esses problemas levariam à Teoria da Relatividade e à Teoria Quântica (Martins, Rosa, 2014).

Segundo Griffiths (2011, p. viii): "a teoria quântica não foi criada - nem mesmo determinada definitivamente - por um indivíduo [...]". Para o autor, a quântica "[...] representa uma mudança abrupta e revolucionária das ideias clássicas, suscitando assim uma forma total e radicalmente não intuitiva e nova de se pensar sobre o mundo". Neste trabalho, não será possível mencionar todos os nomes importantes da Física Quântica e o recorte dos nomes foi feito com base na construção da sequência didática.

Saito (2021) descreve três momentos fundamentais no desenvolvimento histórico da Física Quântica. O primeiro momento, compreendido entre 1900 e 1916, corresponde ao surgimento inicial da teoria, tendo como marcos principais os trabalhos pioneiros de Max Planck sobre a quantização da energia e os estudos de Einstein acerca do efeito fotoelétrico. Esses eventos inauguraram uma nova visão sobre a natureza da luz e da energia, desafiando as concepções tradicionais vigentes na Física Clássica.

O segundo período histórico (1916-1927) foi marcado pelo amadurecimento conceitual da Física Quântica, consolidado pelas contribuições de cientistas como Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger e Louis de Broglie. Nessa fase, surgiram modelos mais consolidados, como o modelo atômico de Bohr, a dualidade onda-partícula e as formulações matemáticas da Mecânica Quântica. Nesse contexto, a teoria foi firmando-se como uma base sólida para a explicação de fenômenos até então inexplicáveis pelos modelos clássicos.

O terceiro período, que inicia em 1927, está diretamente associado às interpretações filosóficas e epistemológicas da teoria, especialmente com o debate gerado pelo princípio da incerteza proposto por Heisenberg e as reflexões sobre o papel do observador no processo de medida. Segundo Saito (2021), foi a partir dessas questões interpretativas, frequentemente mal compreendidas, que emergiram as apropriações indevidas da Física Quântica, originando discursos

pseudocientíficos e místicos, os quais se intensificaram sobretudo a partir da segunda metade do século XX, alcançando forte repercussão cultural e midiática.

James Clerk Maxwell e a natureza da luz

Por volta de 1862, James Maxwell calculou que a velocidade de propagação de um campo eletromagnético é aproximadamente igual à da luz e escreveu: "É muito difícil evitar a conclusão de que a luz consiste em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos" (Griffiths, 2011, p. 262). Esse resultado, extremamente importante, reforça a proposta ondulatória para a natureza da luz.

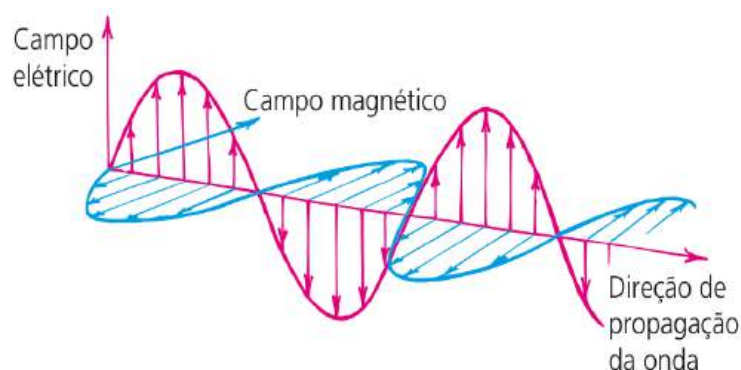
Segundo Griffiths (2011), as equações de Maxwell formam um conjunto de equações diferenciais parciais acopladas, de primeira ordem para **E** e **B**. Elas sugerem que o espaço vazio comporta a propagação de ondas eletromagnéticas viajando a uma velocidade v .

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s},$$

o que é precisamente a velocidade da luz, c . Ou seja, talvez a luz seja uma onda eletromagnética (Griffiths, 2011).

Enquanto o trabalho de Newton unificou a Mecânica, o trabalho de Maxwell no Eletromagnetismo foi chamado de a segunda grande unificação da Física. Maxwell identificou a relação entre as ondas eletromagnéticas e a luz. Nas ondas planas, os campos elétrico e magnético oscilam perpendicularmente, regenerando-se mutuamente e formando uma onda eletromagnética que se propaga a partir das cargas vibrantes (Hewitt, 2015, p. 480). Um exemplo de esquema simplificado da propagação de uma onda eletromagnética plana pode ser visto na figura 1 a seguir.

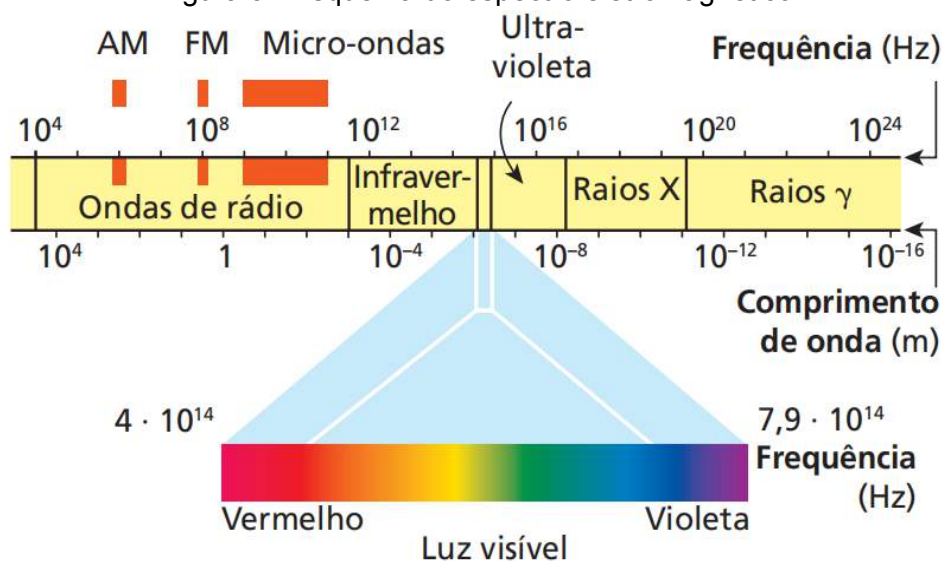
Figura 2 - Os campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética plana.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 488).

Pensando especificamente na luz visível, podemos afirmar que ela é composta por ondas eletromagnéticas que se encontram dentro de uma faixa de frequências perceptíveis pelo olho humano. A luz visível é simplesmente radiação eletromagnética cuja frequência encontra-se em uma faixa específica, entre $4,3 \times 10^{14}$ e $7,9 \times 10^{14}$ vibrações por segundo (Hz) - conforme figura 2 a seguir. No vácuo, as ondas eletromagnéticas propagam-se com a mesma rapidez e diferem entre si nas suas frequências. A classificação das ondas eletromagnéticas, baseada na frequência, constitui o espectro eletromagnético. Vale ainda que a frequência de uma onda eletromagnética no espaço é idêntica à frequência da carga elétrica oscilante que a gerou (Hewitt, 2015, p. 480).

Figura 3 - Esquema do espectro eletromagnético.



Fonte: Retirado de Vilas Boas, Doca, Biscuola (2012, p. 210).

LEITURA COMPLEMENTAR:

Para conhecer melhor a história por trás do conceito de quantum, sugerimos a leitura do artigo “A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck”, de Nelson Studart. O texto apresenta, de forma clara, os caminhos percorridos por Planck até a formulação da quantização da energia, oferecendo um panorama histórico útil para contextualizar esse marco da Física Quântica em sala de aula.



Disponível em: https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_523.pdf

LEITURA COMPLEMENTAR:

Este livro apresenta uma introdução clara e acessível ao estudo da cor, unindo fundamentos históricos, físicos, fisiológicos e práticos. Com linguagem didática e muitas ilustrações, a autora discute temas como a cor-luz, a cor-pigmento, os sistemas cromáticos, a percepção visual e os efeitos fisiológicos da cor.

Silveira, Luciana Martha. Cor: da teoria à prática. 2.

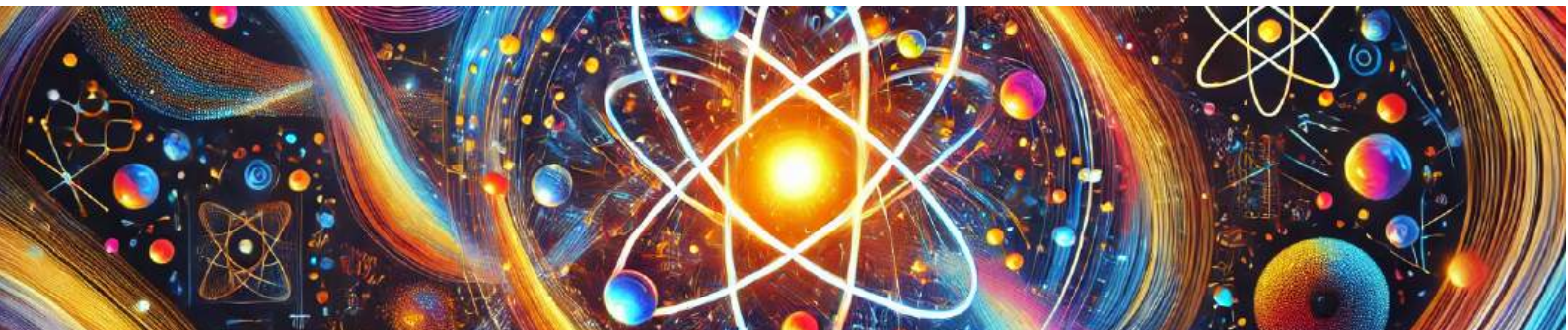
ed. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Disponível em:

<http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1582/4/teoriacor.pdf>



AULA #3

Luz, Cores e Fluorescência



Objetivos da Aula:

- Explorar os efeitos das diferentes fontes de luz sobre os desenhos produzidos na aula anterior.
- Investigar o comportamento da luz ao interagir com materiais fluorescentes.
- Compreender a relação entre espectro eletromagnético, fluorescência e reflexão da luz.
- Estimular o trabalho colaborativo e o pensamento crítico por meio da experimentação.

Recursos necessários:

- Desenhos produzidos pelos estudantes na aula anterior.
- Refletor RGB com controle remoto (ou lâmpada RGB).
- Fonte de luz ultravioleta (UV) (cabine de secagem de unha, lanterna UV ou lâmpada UV de LED).
- Tintas neon para maquiagem ou tinta fluorescente.
- Borrifador com água e laser verde (para demonstração de propagação da luz).
- Folhas para registro e roteiro da atividade (APÊNDICE B – Roteiro Experimental da Atividade Desenhos e Cores).

Introdução à Aula – Propagação da Luz e Reflexão (10 minutos)

Instruções:

1. Inicie a aula perguntando aos estudantes: "A cor que enxergamos nos objetos depende da luz ou apenas do objeto em si?"
2. Explique, com exemplos do cotidiano, que a cor que percebemos depende da luz incidente e de como o objeto reflete ou absorve diferentes cores.
3. Apresente a teoria das cores de Newton e explique o papel da reflexão e absorção da luz na formação das cores que percebemos. O projetor RGB pode ser utilizado nesse momento para auxiliar na compreensão dos estudantes.
4. Sugestão de atividade [extra] para aumentar a curiosidade e introduzir alguns fenômenos luminosos:
 - Realize uma demonstração prática de propagação retilínea da luz:
 - i. Apague as luzes da sala e use um laser verde e um borrifador de água para visualizar o caminho do feixe de luz no ar.
 - ii. Borrife a água para cima e ligue o laser. As gotículas de água dispersam a luz, formando o raio luminoso de forma bem marcada, encantando os estudantes.
 - iii. Pergunte aos estudantes como a experiência pode ajudar a compreender a interação da luz com a matéria.

Figura 4 - Demonstração utilizando laser verde e borrifador de água.



Fonte: Autor.

Experimento com Diferentes Fontes de Luz (30 minutos)

Instruções:

1. Após o momento de introdução, organize os estudantes em grupos e distribua os desenhos produzidos na aula anterior (ou peça que eles tragam de casa).
2. Explique que a proposta inicial da atividade experimental é que eles coloquem seus desenhos sob as diferentes fontes de luz, observem as modificações e registrem.
3. Apague as luzes da sala e utilize as seguintes fontes de iluminação para que os estudantes observem os efeitos:
 - Luz branca (para referência inicial).
 - Refletor RGB, variando entre luz vermelha, azul e verde (para observar a influência de diferentes cores sobre os desenhos).
 - Fonte de luz UV, analisando se algum material fluoresce.

Figura 5 - Refletor RGB e controle remoto utilizados na atividade experimental.



Fonte: Autor.

A fonte de luz UV utilizada foi um secador de unha, conhecido como “cabine”, de baixo custo. É uma fonte de luz de 6W de potência que utiliza LED e emite luz UV e azul/violeta. Outras fontes podem ser utilizadas.

Figura 6 - Fonte de luz UV utilizada na atividade experimental.



Fonte: Autor.

4. Pergunte aos estudantes: "Os desenhos parecem iguais sob todas as iluminações?"
5. Distribua o roteiro experimental (APÊNDICE) e peça que os estudantes respondam às questões sobre o que foi observado.
6. Solicite que registrem:
 - Diferenças entre os desenhos sob cada fonte de luz.
 - Explicações baseadas nos conceitos estudados.
 - Conexões entre fluorescência e espectro eletromagnético.
7. Cada grupo deve entregar um relatório (Modelo no APÊNDICE) no final da aula ou na próxima aula, conforme o tempo disponível.
8. Entregue tintas neon e peça que pintem detalhes adicionais nos desenhos e repitam a observação com a luz UV.
9. Incentive a anotação das observações, destacando como cada tipo de luz altera a percepção das cores.

Figura 6 - Exemplos de desenho observado sob diferentes fontes de luz.



Fonte: Autor.

TINTA FACIAL

FIZEMOS ALGUMAS PINTURAS E
DEPOIS ILUMINAMOS COM
LÂMPADAS UV.

** Sugestões para aplicação da atividade:**

- As tintas de maquiagem e pintura corporal foram muito bem recebidas pelos estudantes, que se divertiram e se engajaram na realização da proposta. Seu uso pode tornar a atividade significativamente mais envolvente e atrativa para os estudantes.
- Estimule a curiosidade com perguntas como: *“Por que algumas tintas brilham sob luz UV e outras não?”*
- Explique brevemente o fenômeno da fluorescência, destacando que ele ocorre devido à absorção e reemissão de luz em comprimentos de onda diferentes.

Figura 7 - Tintas Neon para maquiagem (esq.) e fotos da aplicação (dir.)



Fonte: Autor

Discussão sobre as Observações e encerramento (10 minutos)

Instruções:

1. Peça que cada grupo compartilhe suas percepções sobre as mudanças nos desenhos sob diferentes luzes.
2. Faça perguntas aos estudantes:
 - O que acontece com as cores dos desenhos sob luzes RGB?
 - Qual a relação entre fluorescência e espectro eletromagnético?
 - Por que algumas tintas brilham na luz UV enquanto outras não?
3. Relacione os conceitos explorados com aplicações reais, como:
 - O uso de luz UV para autenticação de cédulas e documentos.
 - O funcionamento de materiais fluorescentes em decorações e festas.
 - O efeito da luz em óculos de proteção UV e sua importância para a saúde ocular.

Resumo da Aula

Conteúdos abordados:

- Conceitual: Teoria das cores, sistema RGB, reflexão da luz e fluorescência.
- Procedimental: Observação e registro de mudanças nos desenhos sob diferentes fontes de luz.
- Atitudinal: Trabalho em pares, análise crítica dos fenômenos observados.

Estratégias didáticas:

- Demonstração com laser e borrifador de água.
- Experimentos interativos com luzes RGB e UV.
- Registro das observações e elaboração de um relatório experimental.

Sugestão de Avaliação:

- Registro detalhado das observações no relatório experimental.
 - Participação na discussão final sobre as propriedades da luz.
-

MATERIAL DE REFERÊNCIA PARA USO DOCENTE:

Breve história sobre a natureza da luz e fenômenos luminosos

Neste momento da sequência didática, retomamos a visão de Isaac Newton sobre a natureza da luz e suas contribuições para a teoria das cores. Seus experimentos com prismas, realizados no século XVII, permitiram demonstrar que a luz branca é composta por diferentes cores, o que marcou um avanço fundamental na compreensão dos fenômenos ópticos. Essa abordagem, baseada na ideia de luz como partículas (corpúsculos), teve grande influência na física clássica e fornece uma base histórica importante para a introdução dos conceitos da Física Quântica.

A Física clássica distingue dois tipos de fenômenos: partículas e ondas. Partículas são pequenos objetos com massa que seguem as leis de Newton, movendo-se em linhas retas a menos que uma força as desvie. Ondas, como as do oceano, se propagam através do espaço e sofrem difração e interferência ao encontrarem obstáculos. Essas propriedades distinguem claramente partículas de ondas, que parecem ser mutuamente exclusivas. Contudo, a classificação da luz como partícula ou onda foi um enigma por séculos (Hewitt, 2015).

Desde a Antiguidade, várias teorias tentaram explicar a natureza da luz. Platão acreditava que a luz consistia em raios emitidos pelo olho, visão compartilhada por Euclides um século depois. Os pitagóricos, por outro lado, defendiam que a luz era composta de partículas minúsculas emitidas por corpos luminosos. Empédocles sugeriu que a luz era formada por ondas de alguma espécie e muito velozes (Hewitt, 2015).

Em 1704, Isaac Newton descreveu a luz como uma corrente de partículas ou corpúsculos, apesar de reconhecer propriedades ondulatórias. Christian Huygens, contemporâneo de Newton, defendia a teoria ondulatória da luz. Com esse histórico, Thomas Young realizou, em 1801, o experimento da fenda dupla, que parecia provar a natureza ondulatória da luz.

Essa visão foi reforçada pela previsão de Maxwell, em 1862, de que a luz transporta energia em campos elétrico e magnético oscilantes. Em 1887, Heinrich Hertz demonstrou a realidade das ondas eletromagnéticas usando circuitos elétricos que produziam faíscas. (Hewitt, 2015).

De acordo com Hewitt (2015), em 1900 Max Planck propôs que a energia era emitida em quantidades discretas, chamadas de *quanta*, com energia proporcional à frequência da radiação. Essa ideia revolucionou a física e marcou o início da Teoria Quântica (ver Seção 3.1.3, na qual esse tema é discutido com maior profundidade). O conceito ganhou força em 1905, quando Albert Einstein publicou um artigo argumentando que a luz interage com a matéria em pequenos "pacotes" de energia, chamados *fótons*, desafiando a visão exclusivamente ondulatória da luz.

Contribuições de Isaac Newton

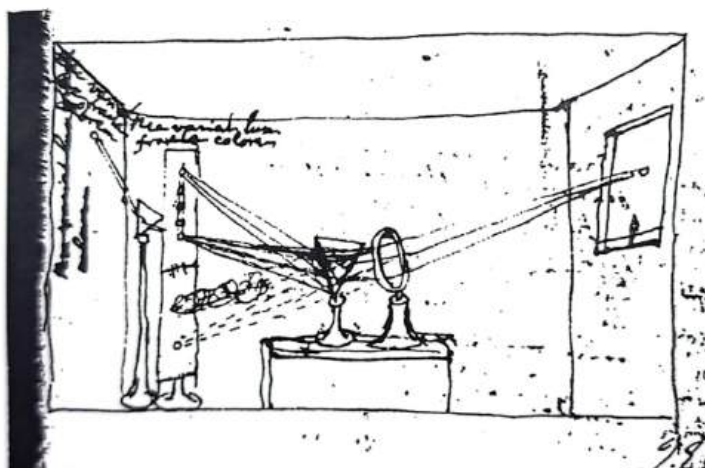
A resposta de um material à incidência de luz depende da frequência da luz e da frequência natural dos elétrons no material. A luz visível oscila a uma frequência muito alta, cerca de 100 trilhões de vezes por segundo (maior que 10^{14} Hz). Para que um objeto eletrizado responda a essas vibrações rápidas, ele deve ter pouca inércia. Como a massa dos elétrons é muito pequena, eles conseguem vibrar nessa frequência. A maioria das coisas ao nosso redor é opaca – absorvem a luz sem reemitir-la. Livros, escrivaninhas, cadeiras e pessoas são opacos. As vibrações comunicadas a seus átomos ou moléculas pela luz são transformadas em energia cinética aleatória, ou seja, em energia interna, fazendo com que os corpos se tornem ligeiramente mais quentes. (Hewitt, 2015, p. 491).

Isaac Newton ganhou fama inicialmente por seus estudos sobre a luz, antes mesmo de suas leis do movimento e da gravitação universal. Por volta de 1665, ao observar imagens de corpos celestes formadas por uma lente, ele notou colorações nas bordas das imagens. Para investigar esse fenômeno, Newton escureceu um quarto, deixando a luz solar entrar apenas por uma pequena abertura circular na janela, projetando uma mancha luminosa na parede oposta. Ao colocar um prisma triangular de vidro no feixe de luz, ele observou que a luz branca se separava nas cores do arco-íris. Um esquemático do experimento descrito pode ser visto na figura 16, a seguir.

Newton demonstrou que a luz branca é composta por todas as cores do arco-íris e que o arco-íris resulta da dispersão da luz solar em pequenas gotas de água no céu. Ele também descobriu que as cores dispersas podiam ser

recombinadas para formar luz branca novamente ao utilizar um segundo prisma (Hewitt, 2015, p. 492).

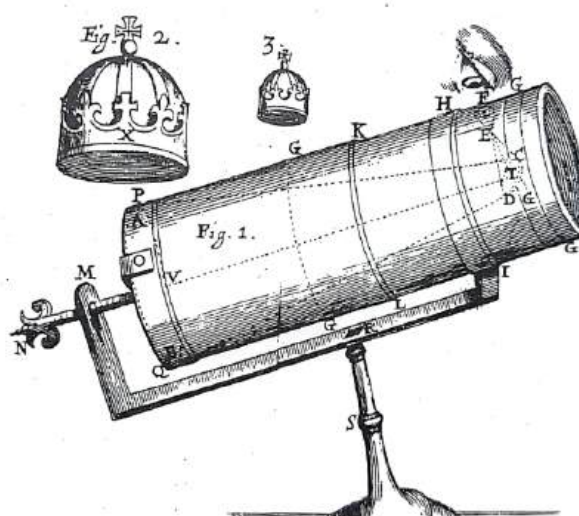
Figura 8 - Esquema original proposto para o experimento de Newton com os prismas.



Fonte: Retirado de Newton (p. 66, 2017)

Em reconhecimento por seus trabalhos, como o estudo da luz, Newton foi eleito membro da Royal Society de Londres. Na academia, ele apresentou o primeiro telescópio refletor do mundo em 1671, que ainda pode ser visto na biblioteca da Royal Society. Um esquema do telescópio projetado por Newton pode ser visualizado na figura 17.

Figura 9 - Na figura, as duas coroas são o mesmo objeto visto a 90 metros de distância pelo telescópio refletor de Newton (fig.2) e por um telescópio refrator (fig.3) como 61 cm de comprimento (que aumentava 14 vezes).



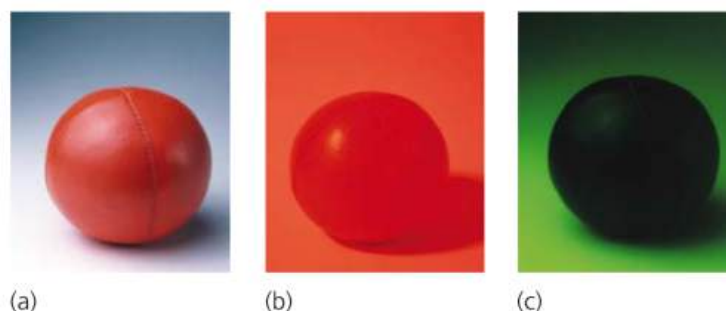
Fonte: Retirado de Newton (2017, p. 103)

Cores e reflexão da luz

Para os físicos, as cores dos objetos não estão nas substâncias dos próprios objetos, nem na luz que eles emitem ou refletem, mas são uma experiência fisiológica que ocorre no olho do espectador a partir da frequência da luz incidente. As cores que percebemos dependem da frequência da luz incidente. Luzes com diferentes frequências são percebidas como diferentes cores; a luz de frequência mais baixa que podemos detectar aparece como vermelha, e a de frequência mais alta como violeta. Entre essas duas extremidades, há uma faixa de matizes que formam o espectro de cores de um arco-íris. Por convenção, esses matizes são agrupados em sete cores: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, índigo e violeta. Juntas, essas cores formam a luz branca. A luz branca do Sol é uma composição de todas as frequências visíveis, além de incluir outras frequências fora da faixa visível, como o ultravioleta e o infravermelho (Hewitt, 2015).

A maioria dos objetos ao nosso redor reflete luz melhor do que a emite, refletindo apenas parte da luz incidente, responsável por suas cores. A luz é refletida pelos objetos de forma semelhante ao som emitido por um diapasão e refletido em um objeto próximo. Átomos e moléculas funcionam de maneira similar: os elétrons mais externos oscilam devido aos campos elétricos das ondas eletromagnéticas, emitindo suas próprias ondas. Materiais diferentes têm frequências naturais distintas para absorver e emitir radiação. Nas frequências de ressonância, a luz é absorvida, enquanto em frequências fora da ressonância, a luz é reemitida, constituindo a reflexão. Normalmente, um material absorve luz de certas frequências e reflete o restante, aparecendo na cor da luz refletida (Hewitt, 2015).

Figura 10: (a) A bola vermelha vista sob luz branca. (b) A bola vermelha vista sob luz vermelha. (c) A bola vermelha vista sob luz verde.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 506).

A aparência de um objeto colorido depende das frequências presentes na luz que o ilumina. Podemos ver essa relação luz x objeto na figura 18, na qual uma bola vermelha é iluminada por três diferentes fontes de luz. Um objeto só pode refletir as frequências presentes na luz incidente. Por exemplo, uma lâmpada incandescente emite mais luz em frequências mais baixas, intensificando os tons vermelhos. Normalmente, definimos a cor "verdadeira" de um objeto como a cor que ele exhibe sob a luz solar (Hewitt, 2015).

Misturando cores: RGB e óptica da visão

Nesta seção, faremos uma breve discussão a respeito das cores, dos sistemas de representação cromática (RGB e CMY) e de algumas de suas aplicações. Como já apresentado anteriormente, as explicações para os fenômenos relacionados à luz passaram a se tornar mais precisas a partir do século XVII, com Isaac Newton, responsável por um grande avanço no estudo da óptica.

A teoria de Newton sobre a luz e as cores teve grande impacto na história da ciência ao demonstrar que a luz branca, ao passar por um prisma, decompõe-se em diferentes cores do espectro - esquemático apresentado anteriormente na figura 16. Essa descoberta contrariava concepções anteriores, que atribuíam a coloração da luz a modificações causadas por meios externos. Newton estabeleceu as cores do espectro visível com base na decomposição da luz solar, defendendo a existência de três cores primárias da luz: vermelho, verde e azul (RGB). No campo dos estudos cromáticos, seus trabalhos são considerados um marco no desenvolvimento da ciência da cor. A chamada ciência da cor está inserida na Teoria da Cor e é definida como o estudo dos aspectos físicos da cor (Silveira, 2015).

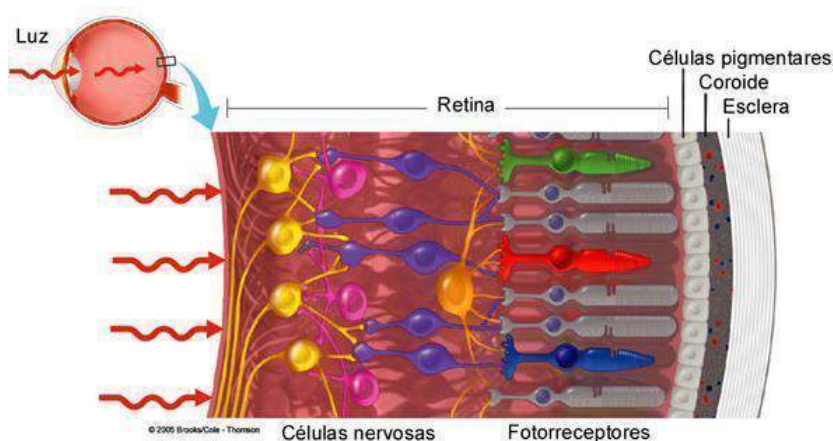
Segundo Silveira (2015), surge nesse contexto um nome importante na literatura que se dedicou ao estudo do fenômeno das cores: Johann Wolfgang von Goethe. O poeta e pensador do século XVIII opôs-se à concepção newtoniana da luz, fazendo duras críticas e argumentando que a teoria proposta por Newton não explicava satisfatoriamente os fenômenos perceptivos relacionados às cores. Para Goethe, a cor era um fenômeno que envolvia a interação entre luz, escuridão e percepção humana, e não apenas uma decomposição objetiva da luz. Sua crítica,

portanto, não era apenas científica, mas também filosófica e estética, como desenvolvido em sua obra Doutrina das Cores.

Essa divergência entre Newton e Goethe reflete uma diferença mais profunda entre duas formas de compreender o mundo: a abordagem objetiva, experimental e matemática de Newton, e a abordagem subjetiva, fenomenológica e perceptiva de Goethe. Enquanto o cientista analisava a luz por meio de instrumentos ópticos e cálculos, o poeta observava como as cores se manifestavam ao olhar humano. Essa disputa ecoa até os dias atuais em discussões sobre sistemas de cores como RGB e CMY: o primeiro, baseado na adição de luz (como ocorre em telas e dispositivos eletrônicos); o segundo, na subtração de pigmentos (como ocorre em materiais impressos). Como mostra Silveira (2015), parte da confusão histórica sobre as cores decorre justamente dessa distinção entre as cores do espectro (luz) e as cores dos pigmentos, percebidas de maneira diferente pelo sistema visual humano. A oposição entre as visões de Newton e Goethe ilustra, portanto, a complexidade do fenômeno cromático, que envolve tanto aspectos físicos quanto sensoriais e culturais.

Para compreender esses processos, é necessário olhar para a composição do olho humano. A Figura 19 apresenta os detalhes estruturais da retina, composta basicamente por células nervosas e fotorreceptores. Dentre esses, destacam-se os cones e os bastonetes. Os cones — divididos em três tipos, sensíveis às faixas do vermelho, verde e azul — são responsáveis pela percepção das cores. Já os bastonetes, representados na figura em cinza, são sensíveis às variações de luminosidade, sendo responsáveis pela visão em tons de cinza, bem como pela visão periférica.

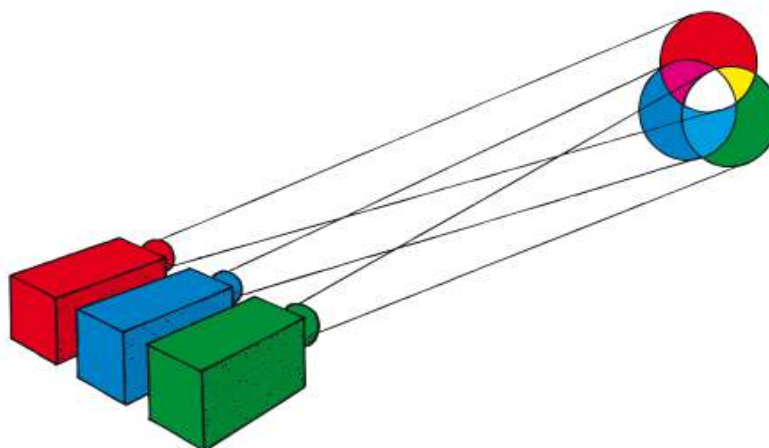
Figura 11 - Esquemático do olho humano.



Fonte: Disponível em:
https://www2.ibb.unesp.br/nadi/Museu2_qualidade/Museu2_corpo_humano/Museu2_como_funciona/Museu_homem_nervoso/Museu_homem_nervoso_visao/Museu2_homem_nervoso_visao_mecanismo.htm. Acesso em: 25 maio 2024.

Ou seja, nossa visão é tricrômica; vemos todas as cores baseadas em apenas três: o vermelho, o azul e o verde; além da escala de cinza. O sistema baseado nas três cores que sensibilizam nossos cones é chamado de RGB (Red, Green and Blue) - trad. vermelho, verde e azul. O RGB trabalha por adição de cores, ou seja, se somarmos as três cores básicas, nas proporções corretas, obteremos a cor branca - figura 20 (Hewitt, 2015).

Figura 12: A mistura de luzes coloridas. Quando três projetores emitem luzes vermelha, verde e azul sobre uma tela branca, as áreas de superposição produzem diferentes cores. O branco é gerado onde as três luzes se sobrepõem.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 506).

A Figura 21 ilustra um experimento com três lâmpadas RGB projetando suas cores na parede branca, criando uma "sombra colorida". Este experimento demonstra o sistema de cores RGB (vermelho, verde e azul) e suas complementares CMY (ciano, magenta e amarelo), permitindo a visualização prática de como essas cores se combinam e interagem para formar outras cores.

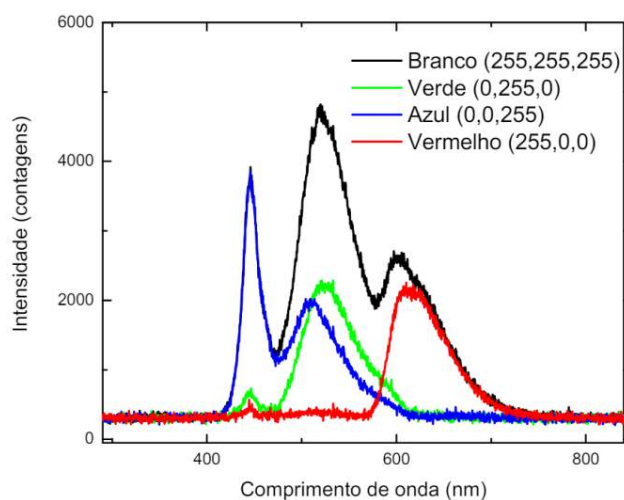
Figura 13: Experimento realizado utilizando 3 lâmpadas RGB.



Fonte: Autor.

A Figura 22 apresenta outro exemplo de composição da luz: o espectro coletado das três cores emitidas por um monitor RGB (vermelho, verde e azul) e da cor branca. No gráfico, observa-se que a cor branca é resultante da sobreposição das cores RGB, evidenciando como a combinação dessas três cores primárias gera a luz branca.

Figura 14- Espectro coletado das principais cores de um monitor RGB e do Branco.



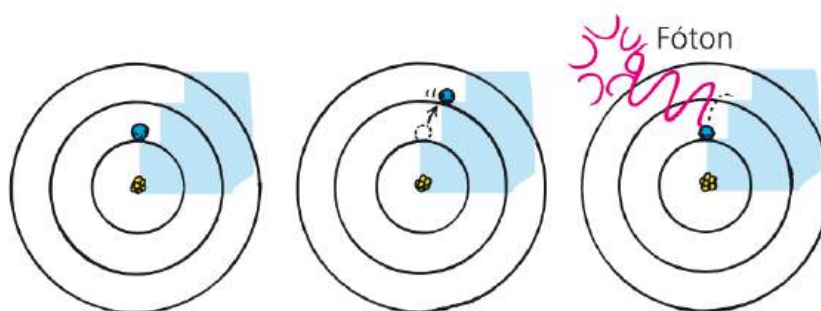
Fonte: Autor.

Fluorescência, Fosforescência e Bioluminescência

A emissão de luz atômica envolve transições de elétrons de estados de maior energia para estados de menor energia dentro dos átomos. Esse processo pode ser entendido, de forma simplificada, pelo modelo planetário do átomo proposto por Bohr. Cada elemento é caracterizado pelo número de elétrons em suas camadas ao

redor do núcleo, possuindo um padrão específico de estados de energia, chamados de estados quânticos, que são discretos e únicos para cada elemento. Quando um elétron é promovido a um nível de energia mais alto, o átomo é considerado excitado. Essa elevação do elétron é temporária. Logo, o elétron retorna ao seu nível de energia mais baixo e o átomo libera a energia adquirida em forma de radiação (Hewitt, 2015). Nesse processo, o átomo passa por uma excitação seguida de relaxação, conforme Figura 23.

Figura 15: Esquema do processo de excitação e relaxação do elétron.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 564).

Quando elétrons "caem" de níveis de energia mais altos para mais baixos, eles emitem fótons. A frequência do fóton está relacionada à diferença de energia entre os níveis. Um fóton pode ser visto como um corpúsculo de pura energia – uma "partícula" de luz – que é ejetado pelo átomo.

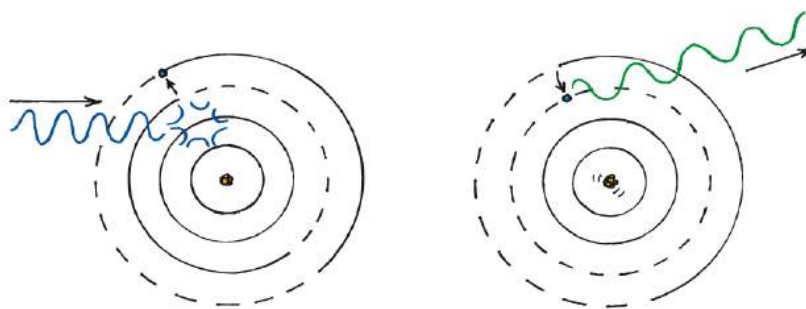
A compreensão dos processos de excitação e relaxação atômica é fundamental para explicar muitos fenômenos em Física, incluindo a fluorescência e a fosforescência. Segundo Hewitt (2015), "o processo de excitação/relaxação pode ser descrito precisamente apenas pela Mecânica Quântica. Ao tentar visualizar o processo em termos da Física Clássica, acabamos chegando a contradições". Isso destaca a necessidade de abordagens quânticas para uma explicação precisa.

Além da agitação térmica e do bombardeio por partículas rápidas, como elétrons, existem outras formas de excitar um átomo. Uma dessas formas é a excitação por calor, onde a energia térmica aumenta a movimentação dos átomos, promovendo elétrons a níveis de energia mais altos. Outra maneira é através da incidência de luz, na qual fótons são absorvidos pelos átomos, fornecendo a energia

necessária para que os elétrons sejam excitados para estados de energia superiores.

Conforme a relação $E = h.f$, a luz de alta frequência, como a ultravioleta, transmite mais energia por fóton do que a luz de frequência mais baixa. Algumas substâncias quando excitadas pela luz ultravioleta, ao relaxarem, emitem luz visível. Este fenômeno é conhecido como **fluorescência**. Nesse processo, um fóton de luz ultravioleta excita o átomo, elevando um de seus elétrons a um estado de energia mais alto. Durante a desexcitação, o átomo pode fazer vários saltos menores, emitindo fótons de energias menores em cada salto. Ou seja, na fluorescência temos uma luz invisível ao olho humano incidindo e uma luz dentro da faixa do visível sendo emitida na relaxação.

Figura 16- Esquemático representando o processo da Fluorescência.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 570).

Certos cristais e grandes moléculas orgânicas, quando excitados, permanecem em estado excitado por um tempo prolongado. Diferente dos materiais fluorescentes, seus elétrons são elevados a órbitas mais altas e ficam aprisionados, resultando em um atraso entre a excitação e a relaxação. Esse fenômeno é conhecido como **fosforescência**. Um exemplo clássico de fosforescência é o fósforo, usado em ponteiros de relógios que brilham no escuro e outros objetos similares. Os átomos ou moléculas desses materiais são excitados pela luz visível, mas ao contrário dos materiais fluorescentes, muitos de seus átomos permanecem em um estado *metaestável* – um estado prolongado de excitação que pode durar várias horas, embora a maioria relaxe mais rapidamente.

Outro processo relacionado à emissão de luz é a **bioluminescência**, que, embora não dependa de excitação por luz ultravioleta ou visível como a

fluorescência e a fosforescência, também envolve transições eletrônicas em átomos ou moléculas. Em organismos bioluminescentes, a excitação eletrônica ocorre por meio de reações químicas, resultando na emissão de luz visível. Segundo Viviani e Bechara (2008), a bioluminescência é o processo de emissão de luz visível por organismos vivos como função de comunicação biológica.

Um exemplo de bioluminescência é a Proteína Fluorescente Verde (GFP), descoberta por Osamu Shimomura, em 1962, ao isolar a proteína de águas-vivas. Ele observou que, ao ser irradiada com luz azul, a GFP emitia luz verde. A GFP tornou-se uma ferramenta essencial para marcar e visualizar processos biológicos em células vivas. Em 2008, Shimomura, Martin Chalfie e Roger Tsien foram agraciados com o Prêmio Nobel de Química por suas contribuições na descoberta e desenvolvimento da GFP e suas aplicações em biologia e medicina.

Figura 17- Visualização de tumor marcado com uma variante vermelha da GFP: uma aplicação biofotônica de proteínas bioluminescentes como GFP e luciferases.

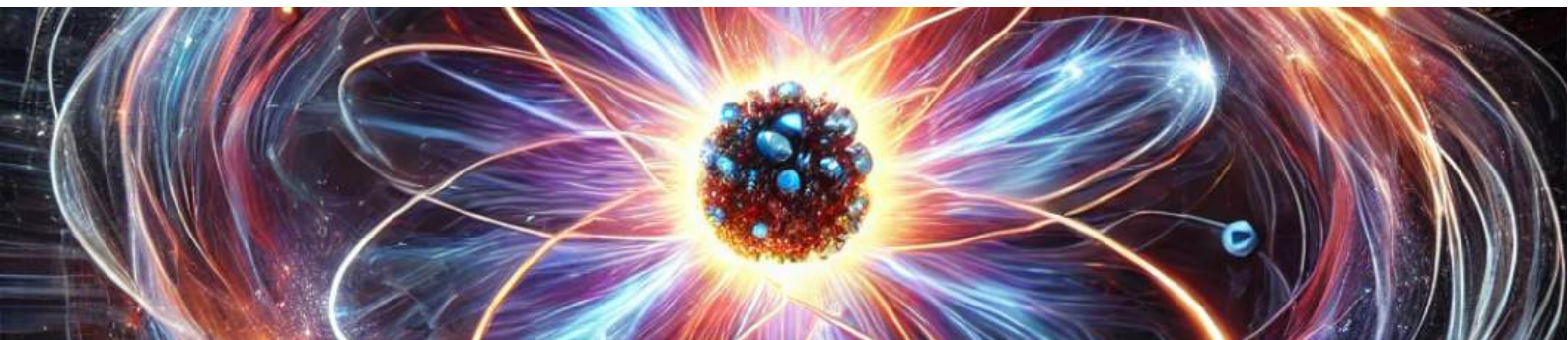


Fonte: Retirado de Viviani e Bechara (2008, p. 26)

O estudo dos fenômenos de emissão de luz, como a fluorescência, fosforescência e bioluminescência, revela a diversidade de interações entre matéria e energia luminosa, sendo explicado pela Física Quântica. Esses fenômenos desempenham papéis fundamentais em várias áreas da ciência, como física e biologia molecular. O desenvolvimento de ferramentas, como o espectroscópio e a utilização de proteínas fluorescentes como a GFP, exemplifica o impacto do conhecimento da luz em avanços científicos e tecnológicos, com aplicações inovadoras na ciência e na medicina.

AULA #4

Fluorescência, Quantização da Energia e Salto Quântico



Objetivos da Aula:

- Discutir as observações feitas no experimento anterior, analisando os efeitos das diferentes fontes de luz.
- Introduzir os conceitos de quantização da energia e salto quântico como modelo explicativo para a fluorescência e as emissões luminosas, evidenciando a limitação da física clássica para explicar o fenômeno.
- Contextualizar historicamente o desenvolvimento da Física Quântica, desde a radiação de corpo negro até o modelo atômico de Bohr.

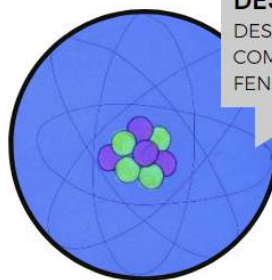
Recursos necessários:

- Projetor ou TV multimídia para apresentação de slides e vídeo.
- Questionário Pós-Atividade (Impresso ou online).

Discussão das observações e reflexões (15 minutos)

Instruções:

1. Divida os estudantes em pequenos grupos e peça que compartilhem suas anotações sobre o comportamento dos desenhos sob diferentes fontes de luz.



DESENHO DOS ALUNOS

DESENHO DE UMA ALUNA ILUMINADO COM LÂMPADA UV APRESENTANDO O FENÔMENO DA FLUORESCÊNCIA.

2. Projete as imagens de um ferro incandescente e de um vagalume, questionando:
- O que esses dois fenômenos têm em comum?
 - Será que o mecanismo de emissão de luz é o mesmo?
 - Como isso se relaciona com a fluorescência observada na aula anterior? Tem relação com o “brilho neon” ?

Figura 18 - Imagens apresentadas aos estudantes: ferro incandescente e vagalume.



Disponível em: <https://depositphotos.com/br/photos/ferro-incandescente.html>

acesso em 21/10/2024

3. Registre as respostas dos estudantes no quadro e conduza a transição para a explicação teórica.

 Sugestões para aplicação da atividade:

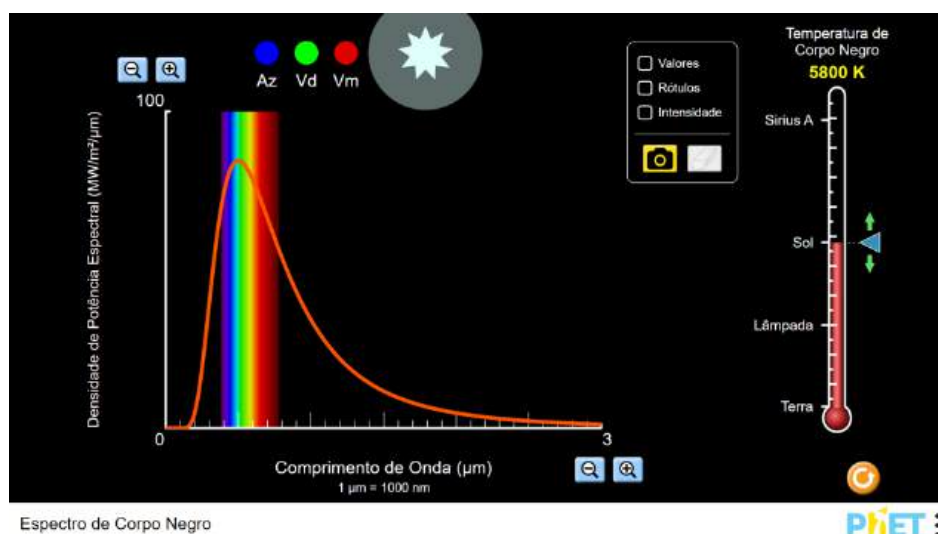
- Direcione a discussão para a diferença entre incandescência e luminescência, destacando as diferenças nos fenômenos de fluorescência, fosforescência e bioluminescência.

Introdução ao Salto Quântico e Quantização da Energia (15 minutos)

Instruções:

1. Faça uma “pausa histórica”, contextualizando os estudantes no ano de 1900 e apresentando as contribuições de Max Planck sobre a radiação de corpo negro e o problema da catástrofe do ultravioleta.
2. Utilize o Simulador PHET – Radiação de Corpo Negro disponível em [PHET Colorado](#) para demonstrar como a radiação de corpo negro varia com a temperatura.

Figura 19 - Simulador sobre espectro de Corpo Negro utilizando durante a aula.



Fonte: Autor (disponível

em: https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_all.html?locale=pt_BR).

3. Apresente a quantização de Planck, destacando a equação $E = h \cdot f$, e relacione com a necessidade de um novo modelo atômico.
4. Explique a evolução do modelo atômico de Rutherford para o modelo de Bohr, mostrando como os níveis de energia e as transições eletrônicas foram introduzidos para explicar a emissão de luz pelos átomos.

 Sugestões para aplicação da atividade::

- Relacione o conceito de salto quântico com a fluorescência observada na aula anterior.
- Pergunte aos estudantes: "Se a luz ultravioleta fez os materiais brilharem na aula passada, qual é o papel da energia nesse processo?"
- Se houver disponibilidade de tempo e recursos, os estudantes podem explorar o simulador de forma interativa, em vez de apenas acompanhar a apresentação sugerida.

Aplicação Conceitual e Vídeo Explicativo (10 minutos)

Instruções:

- 1) Apresente o vídeo: A Escala do Universo Quântico | O que é quantização? disponível em: [YouTube - Universo Narrado](#).
- 2) Peça que os estudantes anotem pontos principais enquanto assistem ao vídeo.
- 3) Após o vídeo, faça uma discussão guiada com as seguintes perguntas:
 - a) Como a ideia de quantização de energia mudou nossa visão sobre o átomo?
 - b) Qual é a relação entre salto quântico e espectros de emissão atômica?
 - c) Como a Física Quântica pode ser aplicada em tecnologias do cotidiano?

Questionário Pós-Atividade (10 minutos)

Instruções:

- 1) Distribua o Questionário Pós-Atividade.
- 2) Dê 10 minutos para os estudantes responderem individualmente às questões, como:
 - a) A teoria das cores clássica consegue explicar as diferenças observadas nos desenhos sob luz branca e luz colorida? Justifique.
 - b) O que são materiais fluorescentes e sob quais condições eles brilham?
 - c) Explique o conceito de salto quântico e sua relação com fluorescência.
 - d) Pesquise sobre salto quântico e relate os resultados apresentados pelo buscador.
 - e) Qual a relação entre o brilho observado com a luz UV e o conceito de salto quântico?

 Sugestões para aplicação da atividade::

- Incentive os estudantes a utilizarem seus registros da atividade experimental e as explicações dadas em aula para responderem ao questionário.

Resumo da Aula

Conteúdos abordados:

- Conceitual: Fluorescência, salto quântico, estrutura atômica, corpo negro, quantização da energia e modelo de Bohr.
- Procedimental: Pesquisa sobre salto quântico e fluorescência, análise de fenômenos de emissão de luz.
- Atitudinal: reflexão crítica sobre os fenômenos observados.

Estratégias didáticas:

- Compartilhamento de observações e discussão em grupo.
- Aula expositiva com imagens e utilização do simulador PHET.
- Exibição de vídeo e debate guiado.
- Aplicação de questionário reflexivo.

Sugestão de Avaliação:

- Participação na discussão e registros das observações do experimento.
- Respostas ao questionário pós-atividade.

MATERIAL DE REFERÊNCIA PARA USO DOCENTE:

A investigação do problema da radiação térmica

Segundo Martins e Rosa (2014), o surgimento da Teoria Quântica é resultado das investigações do que era chamado “corpo negro” – um corpo ideal que quando aquecido pode emitir radiação infravermelha, luz visível e outras radiações. Ainda segundo os autores, inicialmente foi desenvolvida a teoria dos calores específicos – e não do corpo negro – que chamou a atenção da comunidade científica para o problema da quantização de energia. Durante os primeiros vinte anos do século XX, cientistas como Planck, Einstein e Bohr contribuíram significativamente para o desenvolvimento da quântica e serão citados ao longo do texto.

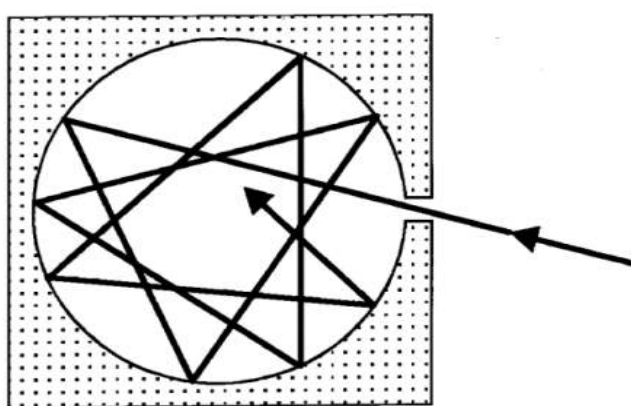
Um corpo aquecido emite radiação eletromagnética em um amplo espectro contínuo de frequências, principalmente na região do infravermelho, com intensidade variável que atinge um máximo em um determinado comprimento de onda. O Sol,

cuja temperatura na superfície é de cerca de 6.000°C , é o exemplo mais conhecido de emissão de radiação térmica, cujo espectro abrange toda a região visível, incluindo ainda comprimentos de onda maiores (infravermelho) e menores (ultravioleta).

De maneira geral, matéria e radiação interagem atingindo o equilíbrio termodinâmico através de trocas de energia. Os corpos que emitem espectros térmicos de caráter universal, cujas superfícies absorvem toda a radiação térmica incidente sobre eles, são chamados de corpos negros. Esses corpos não refletem nem transmitem radiação e sua emissão depende exclusivamente de sua temperatura (Eisberg, Resnick, 1979).

Apesar de ser um corpo ideal, um corpo negro pode ser construído com boa aproximação utilizando uma caixa oca (como um forno) com paredes internas metálicas e uma pequena abertura para a passagem de radiação, conforme ilustrado na figura 3 a seguir. A caixa deve ser revestida com um excelente isolante térmico e espelhada externamente, refletindo toda a radiação incidente, exceto na abertura. A radiação que penetra na cavidade tem uma probabilidade muito pequena de escapar, permanecendo no interior, sendo espalhada pelas paredes até atingir o equilíbrio térmico. Desta forma, aproximamos que toda a radiação incidente é absorvida pelo corpo (Studart, 2000).

Figura 20 - Representação esquemática de um corpo negro.



Fonte: Retirado de Studart (2000, p. 524).

A distribuição de energia em um corpo negro foi estudada considerando a termodinâmica, a teoria eletromagnética e a mecânica estatística, mas seguiu sem solução. A *Lei do deslocamento de Wien*, proposta pelo físico Wilhelm Wien em

1896, foi uma tentativa da Física Clássica de explicar os fenômenos relacionados à radiação térmica. A lei descreve a relação entre a temperatura de um corpo negro e o comprimento de onda no qual a emissão de radiação é máxima, sendo fundamental para a compreensão do comportamento da radiação térmica e amplamente aplicada em astrofísica e em estudos sobre radiação térmica.

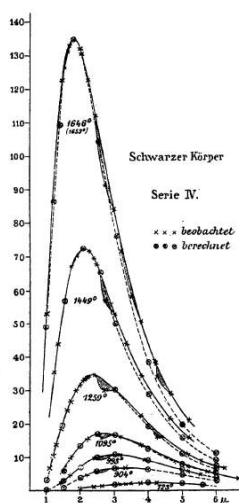
A origem do nome "lei de deslocamento" para apelidar a Lei de Wien deve-se ao fato de que o comprimento de onda, no qual a intensidade de radiação é máxima, varia com a temperatura de acordo com a relação (3.4) a seguir. Na equação, λ representa o comprimento de onda com maior emissão, T é a temperatura e b representa uma constante.

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = b \quad \text{ou} \quad \lambda_{\text{máx}} \propto \frac{1}{T} \quad (3.4)$$

A equação (3.4) foi verificada experimentalmente inúmeras vezes, destacando os trabalhos do grupo de Friedrich Paschen (1865-1974) e do grupo de Otto Lummer (1860-1925) e seus colegas de laboratório: Ernst Pringsheim (1859-1917), Heinrich Rubens (1865-1922) e Ferdinand Kurlbaum (1857-1927).

O gráfico obtido por Lummer e Pringsheim em novembro de 1899 pode ser visto na figura 4 a seguir e apresenta a intensidade espectral como função do comprimento de onda (Studart, 2000).

Figura 21 - Gráfico histórico da Intensidade espectral como função do comprimento de onda.



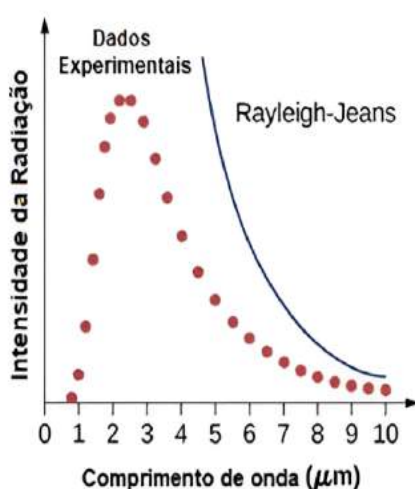
Fonte: Retirado de Studart (2000, p. 526).

O problema é que outros estudos subsequentes, com mais dados coletados, demonstraram que a Lei de deslocamento falhava para comprimentos de onda longos - baixas frequências - em uma ampla faixa de temperaturas (Studart, 2000).

Outra equação historicamente importante é a proposta no modelo de Lord Rayleigh (John William Strutt, 1842-1919), publicada em uma curta nota em junho de 1900. A lei de radiação de Rayleigh é conhecida como lei de Rayleigh-Jeans, após a contribuição de James Jeans (1877-1946), em maio de 1905.

A Lei de Rayleigh-Jeans funciona bem em baixas frequências, mas falha no limite de grandes frequências, pois a intensidade seria infinita na região ultravioleta. Este fato ficou conhecido como “catástrofe do ultravioleta”, graças a Paul Ehrenfest (1880-1933). Na figura 5 a seguir podemos ver a discrepância entre os dados experimentais e equação proposta por Rayleigh-Jeans.

Figura 22 - Gráfico dos pontos experimentais (pontos vermelhos) e da previsão teórica da Física Clássica - Rayleigh e Jeans (linha sólida azul).



Fonte: Disponível em:

https://phys.libretexts.org/@api/deki/files/15627/CNX_UPhysics_39_01_rayleigh.jpg?revision=1.
Acesso em: 9 de julho de 2024.

A distribuição da energia da radiação térmica entre as diversas frequências já havia sido medida com precisão. No entanto, nenhuma teoria existente até então foi capaz de explicar adequadamente os resultados obtidos. Foi Max Planck quem, ao introduzir a quantização da energia por meio de artifícios matemáticos, conseguiu fornecer uma solução inicial para o problema, abrindo caminho para o desenvolvimento da Física Quântica. Mesmo que a abordagem de Planck tenha sido

inicialmente uma solução matemática, ela lançou as bases para uma nova compreensão dos fenômenos envolvendo radiação térmica.

Planck e o início da quantização da energia

Os primeiros trabalhos sobre a quantização da energia foram apresentados por Planck perante a Academia Alemã de Física, em 1900. Na primeira comunicação, Planck propôs uma nova fórmula para a distribuição espectral da radiação de corpo negro. Na segunda, introduziu a hipótese de quantização da energia, utilizando um método não-ortodoxo inspirado pelas ideias da mecânica estatística de Ludwig Boltzmann (1844-1906) (Studart, 2000).

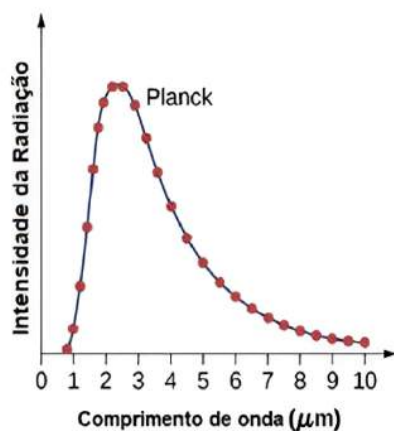
Ele apresentou o artigo “Sobre a Teoria da Lei da Distribuição de Energia no Espectro Normal”, no qual tentou explicar as propriedades observadas da radiação térmica. Planck sugeriu que os osciladores harmônicos na superfície de um corpo negro possuem valores específicos de energia, expressos pela equação (3.5) a seguir, onde n é o número quântico inteiro, h é a constante de Planck, e f é a frequência do oscilador (Eisberg, Resnick, 1979).

$$E = n.h.f \quad (3.5)$$

Planck apresentou essa teoria audaciosa, que conflitava com a Física Clássica, considerando que osciladores harmônicos simples só podiam ter determinados valores discretos de energia. Inicialmente, essa solução apareceu como um mero artifício matemático utilizado por Planck, sem uma intenção conceitual explícita de quantização da energia. O físico, ao resolver o problema, afirmou que “após algumas semanas do mais extenuante trabalho da minha vida, a escuridão se desfez e uma inesperada vista começou a surgir” (Studart, 2000, p. 524).

A proposta de Planck mostrou-se coerente com os dados experimentais da época, como ilustrado na Figura 6. Ao dividir a energia em “quanta”, ele conseguiu explicar a distribuição da radiação térmica, que até então não era adequadamente descrita pelas teorias clássicas. Esse avanço consolidou sua proposta e forneceu uma base experimental sólida para o que viria a ser um dos pilares da Física Quântica.

Figura 23 - Resultado teórico de Planck (curva contínua) e curva experimental de radiação do corpo negro (pontos).



Fonte: Disponível em:

"https://phys.libretexts.org/@api/deki/files/15625/CNX_UPhysics_39_01_planck.jpg?revision=1".

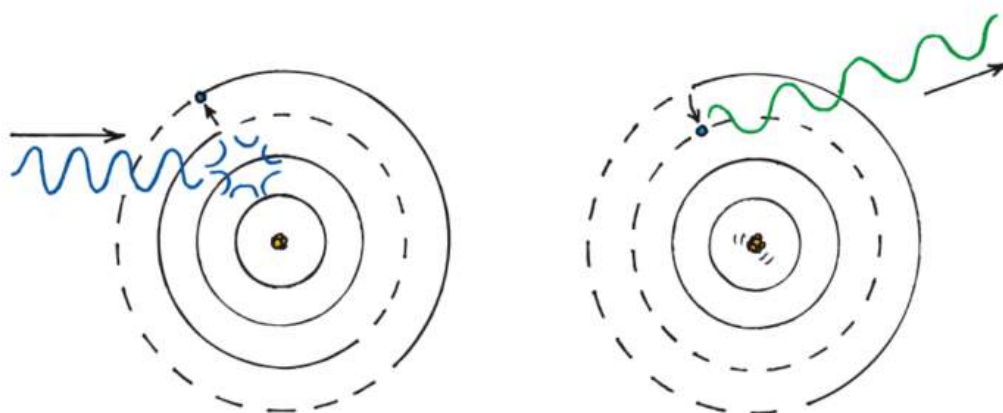
Acesso em: 9 de julho de 2024.

No contexto da radiação do corpo negro, Planck formulou sua hipótese ao considerar que matéria e radiação interagem e atingem o equilíbrio termodinâmico por meio da troca discreta de energia, o que levou à introdução da quantização da energia (Studart, 2000).

1913 e o novo modelo para a Matéria de Bohr

Segundo Eisberg e Resnick (1979), foi o problema da instabilidade do átomo que levou Niels Bohr, em 1913, a propor seu modelo atômico. Ele obteve seu doutorado em 1911 e trabalhou inicialmente no laboratório de J. J. Thomson - descobridor do elétron - no Trinity College, Cambridge, e foi orientando de Ernest Rutherford na Universidade de Manchester. Rutherford havia descoberto o núcleo atômico, o que levou Bohr a incorporar princípios quânticos ao modelo atômico. Em 1913, Bohr propõe que os elétrons se movem em órbitas definidas ao redor do núcleo (Figura 8) e emitem ou absorvem luz ao saltarem entre essas órbitas. Esse modelo explicou as linhas espectrais do hidrogênio e outras séries.

Figura 24 - Modelo de camadas do átomo de Bohr representando os processos de absorção (esq.) e emissão (dir.).



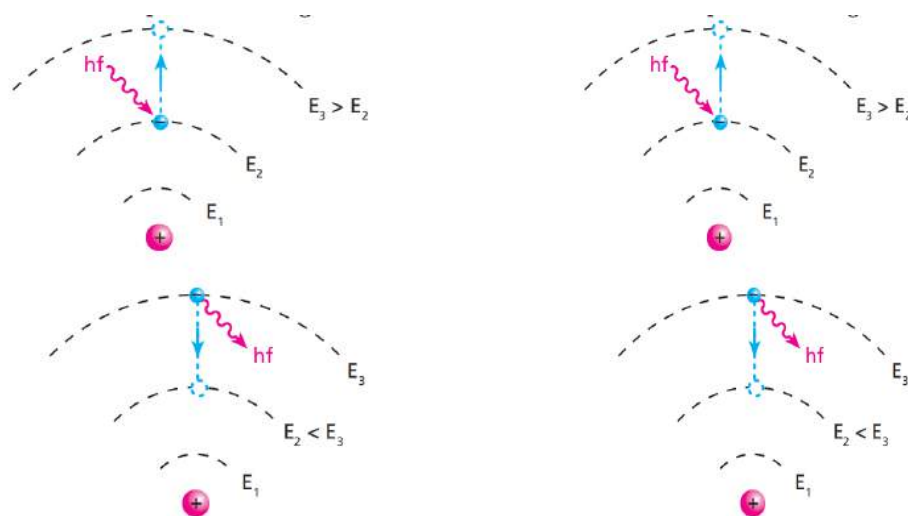
Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 570).

Bohr postulou que, para a eletrosfera de um átomo manter-se estável, os elétrons desse átomo só podem ocupar determinados níveis de energia, denominados estados estacionários ou quânticos. Cada um desses estados corresponde a uma energia específica. Em seu modelo, Bohr propôs que, em um estado estacionário, o átomo não emite radiação. Assim, sua eletrosfera mantém-se estável.

Além disso, o estado estacionário no qual os elétrons estão nos níveis mais baixos de energia é chamado de estado fundamental. Os demais estados permitidos são denominados estados excitados. Somente o estado fundamental e os estados excitados bem definidos são permitidos; qualquer outro estado é proibido (Biscuola, Doca, Villas Bôas, 2012).

Bohr também postulou que, quando um elétron passa de um estado estacionário para outro, ele emite ou absorve um *quantum* de energia igual à diferença entre as energias desses estados, o chamado Salto quântico - ilustrado na figura 9.

Figura 25 - (esq.) Elétron absorvendo um *quantum* de Energia $h.f$ e mudando para um estado mais externo. (dir.) Elétron emite um *quantum* de energia $h.f$ ao retornar para seu estado.



Fonte: Retirado de Biscuola, Doca, Villas Bôas (2012, p.348).

LEITURA COMPLEMENTAR:

Para aprofundar nos estudos sobre o “Salto Quântico” e sua melhor compreensão e interpretação, indicamos o artigo do Pergunte ao CREF:

<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=salto-quantico>



AULA #5

O Uso do "Salto Quântico" na Pseudociência



Objetivos da Aula:

- Diferenciar ciência de pseudociência, analisando como conceitos científicos são distorcidos para criar discursos pseudocientíficos.
- Investigar o uso indevido do termo "salto quântico" em contextos pseudocientíficos.
- Desenvolver estratégias para identificar textos pseudocientíficos e promover o pensamento crítico.

Recursos necessários:

- Computadores ou celulares com acesso à internet (para pesquisa sobre pseudociência e salto quântico).
- Projetor ou TV multimídia (para exibição de imagens e sites analisados).

Introdução à Aula – O que é Pseudociência? (20 minutos)

Instruções:

1. Faça perguntas iniciais aos estudantes: "Já ouviram falar no termo pseudociência?", "O que a diferencia da ciência?", "Como é possível distinguir?"
2. Anote algumas respostas no quadro e vá discutindo com os estudantes.
3. Apresente estratégias para identificar pseudociência.

4. Dê exemplos reais, como "cura quântica", e peça que os estudantes identifiquem características pseudocientíficas.
5. O exemplo a seguir pode servir de exemplo para identificar elementos de pseudociência.

Figura 26 - Exemplo de pseudociência quântica.

Salto Quântico na sua vida

Olá pessoal,

Hoje vamos falar sobre o Salto Quântico na sua vida!

O Salto Quântico é um conceito da física quântica criado por Niels Bohr em 1913, que ocorre quando se excita um átomo, ou seja, dá-se energia e ele, promovendo movimentos nos elétrons que se afastam do núcleo saltando de nível. Ex nível 1 para nível 2, nível 2 para nível 4.

O mais interessante é que os elétrons saltam de forma descontínua, ou seja, eles simplesmente desaparecem de uma órbita e aparecem em outra, sem ter estado no espaço existente entre elas!

Podemos observar que não há uma trajetória contínua para ocorrer o salto. E como tudo isso pode influenciar o nosso dia a dia?

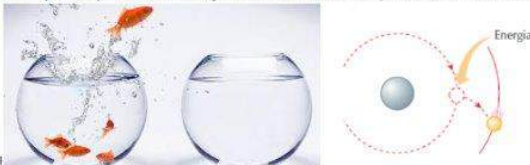
Quando estamos agindo no mundo condicionados a nossa identidade, ao nosso ego, agimos de forma cartesiana, contínua, causal... Achamos que fazemos escolhas, mas na verdade optamos apenas dentro de um conjunto de ações já condicionadas pelas nossas crenças e verdades ensinadas ao longo das nossas vidas.

O salto quântico pode ajudar você a obter vários resultados na sua vida, como melhorar um relacionamento, emagrecer, fazer uma equipe funcionar melhor, conquistar mais saúde.

Para dar um salto quântico, você deve sair do condicionamento da sua mente, utilizando qualquer recurso (energia adicionada a você) que promova essa mudança. Exemplo: meditação, leitura que um livro, buscar conhecimento, tratamento do corpo físico e emocional.

Quando o indivíduo recebe essa "energia externa" que o motiva a saltar na vida, ocorre uma mudança de percepção recriando a sua realidade!

Einstein dizia: "loucura é fazer hoje o mesmo que se fez ontem e querer que o amanhã seja diferente." Portanto, para recriarmos nossa vida, precisamos fazer uso



desta descontinuidade quântica. Da verdadeira Criatividade!

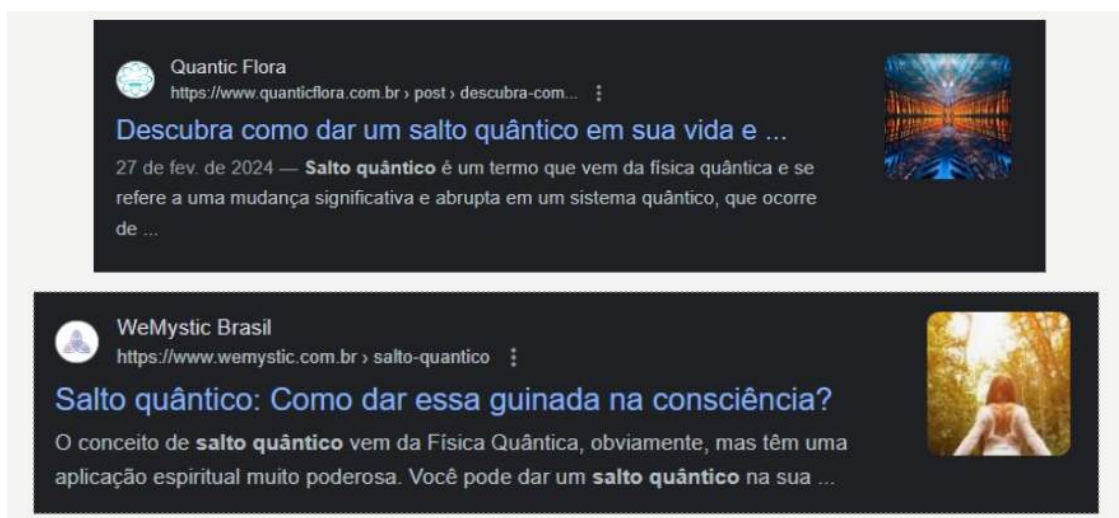
Fonte: autor

Pesquisa sobre "Salto Quântico" (15 minutos)

Instruções:

1. Divida os estudantes em pares e peça que pesquisem no Google (ou outro buscador) o termo "salto quântico" usando seus celulares.
2. Cada dupla deve anotar os três primeiros resultados e classificá-los como:
 - Científico (se apresenta embasamento teórico correto).
 - Pseudocientífico (se usa linguagem científica de forma incorreta para sustentar alegações sem fundamento).

Figura 32 - Exemplos de sites encontrados ao pesquisarmos “salto quântico” na ferramenta de busca Google.



Fonte: Autor.

3. Pergunte aos estudantes:

- O que apareceu nas pesquisas de cada um?
- O Google apresentou o mesmo tipo de informação para todos?
- Por que alguns estudantes receberam mais resultados pseudocientíficos do que outros?

4. Peça que os estudantes compartilhem exemplos reais de pseudociência que já encontraram no dia a dia.

- Como a desinformação científica pode impactar a vida das pessoas?
- Como podemos ajudar a combater esse tipo de desinformação?

5. Incentive os estudantes a discutirem o papel da educação científica na formação de cidadãos críticos.

 Sugestões para aplicação da atividade::

- Explique que os algoritmos de busca personalizam os resultados de acordo com o perfil do usuário, o que pode reforçar crenças pré-existentes e dificultar o acesso à ciência.
- Reforce que a pseudociência pode ter consequências reais, como tratamentos ineficazes e perda de dinheiro.

Resumo da Aula

📌 Conteúdos abordados:

- Conceitual: O que é pseudociência? Como identificar textos pseudocientíficos? O uso do termo "salto quântico" fora do contexto científico.
- Procedimental: Pesquisa sobre pseudociência, análise de sites, produção de resumos críticos.
- Atitudinal: Trabalho em pares, desenvolvimento do pensamento crítico.

📌 Estratégias didáticas:

- Investigação online sobre salto quântico e pseudociência.
- Discussão sobre o impacto da desinformação científica.
- Produção de um portfólio coletivo sobre pseudociência.

📌 Sugestão de Avaliação:

- Participação na pesquisa online e discussão.
- Clareza na análise crítica sobre pseudociência.
- Qualidade das contribuições.

LEITURA COMPLEMENTAR:

- E-book “Desconstruindo o Charlatanismo Quântico”, elaborado pelo estudante Styves Barros Miranda e pela Professora Doutora Rafaelle da Silva Souza. A cartilha apresenta, em linguagem acessível e apropriada para o ensino básico (Fundamental e Médio), os conceitos básicos da Física Quântica e orientações para identificar usos indevidos e pseudocientíficos dessa área do conhecimento.

Link: [Desconstruindo o charlatanismo quântico.pdf](#)



LEITURA COMPLEMENTAR:

- Para aprofundar o entendimento sobre o fenômeno cultural do *misticismo quântico*, recomendamos a leitura do artigo de **Márcia Tiemi Saito**, intitulado “*O Fenômeno Cultural do Misticismo Quântico: possibilidades e perspectivas de investigação*”. O artigo discute como o termo "quântico" tem sido amplamente difundido em contextos não científicos, gerando confusão conceitual e desafios para a Educação Científica.

Disponível em: [O Fenômeno Cultural do Misticismo Quântico: possibilidades e perspectivas de investigação](#)



LEITURA COMPLEMENTAR:

- Outra sugestão de leitura é o artigo de **Oswaldo Pessoa Jr.**, intitulado “*Análise de um Típico Argumento Místico-Quântico*”. O autor examina criticamente a associação entre espiritualidade e Física Quântica, amplamente difundida pela mídia, utilizando como exemplo a chamada “lei da atração”.

Disponível em:

<https://opessoa.fflch.usp.br/textos>



AULA #6

Construção e Uso de um Espectrógrafo Caseiro



Objetivos da Aula:

- Compreender o funcionamento de um espectrógrafo e sua aplicação na separação de espectros de luz.
- Relacionar a análise espectral com os conceitos de salto quântico, emissão e absorção de luz discutidos anteriormente.
- Construir e utilizar um espectrógrafo caseiro para celular, registrando espectros de diferentes fontes de luz.
- Desenvolver habilidades experimentais e incentivar o trabalho colaborativo.

Recursos necessários:

- Molde impresso do espectrógrafo (disponível no APÊNDICE).
- Papel preto/cartolina preta.
- CD ou DVD usado (para ser utilizado como grade de difração).
- Fita adesiva e tesoura.
- Celulares ou câmeras (para captura dos espectros).
- Fontes de luz variadas: luz branca (fluorescente ou LED), refletores RGB, luz solar indireta.
- Projetor ou TV multimídia (para introdução teórica e apresentação de espectros).

Introdução à Aula – O que é um Espectrógrafo? (10 minutos)

Instruções:

1. Projete no quadro a pergunta: "O que podemos descobrir ao analisar a luz?" e peça que os estudantes deem respostas.
2. Explique que um espectrógrafo é um equipamento utilizado para separar a luz em suas diferentes cores ou comprimentos de onda.
3. Mostre exemplos reais de espectros de diferentes fontes de luz, incluindo:
 - Espectro contínuo (exemplo: luz do Sol).
 - Espectro de emissão (exemplo: hidrogênio).
 - Espectro de absorção (exemplo: atmosferas estelares).

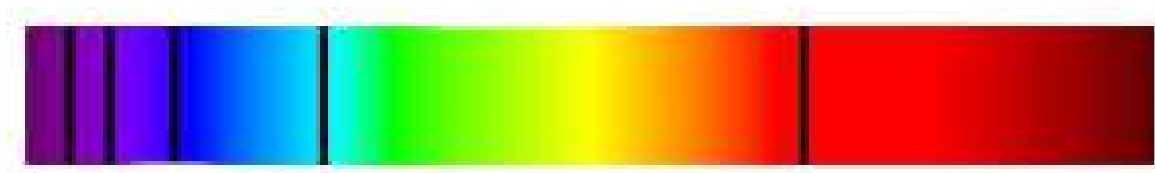
Figura - Espectro de emissão do átomo de hidrogênio.



Fonte: disponível em

<http://demonstracoes.fisica.ufmg.br/artigos/ver/108/19.-Espectros-de-emissao-e-absorcao>

Figura - Espectro de absorção do átomo de hidrogênio.

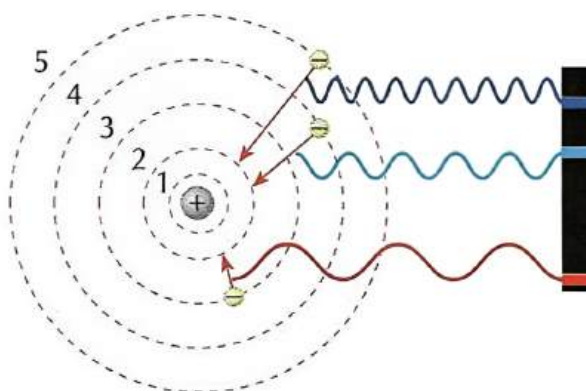


Fonte: disponível em

<http://demonstracoes.fisica.ufmg.br/artigos/ver/108/19.-Espectros-de-emissao-e-absorcao>

4. Relacione o experimento com o salto quântico e as transições eletrônicas discutidas anteriormente.

Figura 27 - Três dos possíveis saltos quânticos de um elétron no átomo de hidrogênio, evidenciando a relação com os espectros.



Fonte: <https://www.slideshare.net/newtondasilva/aula-4-modelo-atmico-de-bohr>

Construção do Espectrógrafo Caseiro (20 minutos)

Instruções:

1. Distribua o molde impresso do espectrógrafo (disponível no APÊNDICE).
2. Explique os componentes do espectrógrafo e como ele funciona:
 - O CD/DVD atua como uma grade de difração, separando a luz em diferentes comprimentos de onda.
 - A fenda de entrada da luz permite direcionar melhor a luz incidente.
 - O celular será utilizado para capturar e registrar o espectro formado.
3. Oriente os estudantes na montagem do espectrógrafo:
 - Recortar o molde e montar a estrutura com fita adesiva.
 - Posicionar o pedaço de CD/DVD corretamente.
 - Fixar o espectrógrafo na câmera do celular.



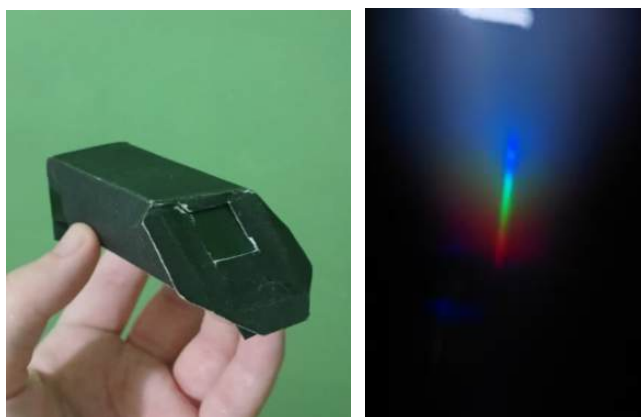
4. Circule pela sala, auxiliando os grupos na construção e garantindo que todos tenham um espectrógrafo funcional ao final da atividade.

Figura 28 - Molde para construção do espectrógrafo.



Fonte: Autor

Figura 29 - (esq.) Espectrógrafo construído conforme o modelo fornecido. (dir.) Espectro da luz branca emitida por uma lâmpada fluorescente.



Fonte: Autor

 Sugestões para aplicação da atividade:

- Se houver tempo limitado, prepare alguns espectrógrafos montados previamente para demonstrar o funcionamento antes da construção pelos estudantes.
- **VÍDEO** explicando a montagem:
 -  Montagem de espectroscópio para câmera de smart...



Observação e Registro dos Espectros (15 minutos)

Instruções:

1. Os estudantes devem utilizar seus espectrógrafos acoplados ao celular para analisar diferentes fontes de luz:
 - Luz branca fluorescente.
 - Luz LED.
 - Refletores RGB (alternando as cores para observar espectros individuais).
 - Luz do Sol (indireta, para evitar danos aos olhos ou ao celular).
2. Peça que os estudantes fotografem ou filmem os espectros obtidos e comparem os resultados.
3. Discuta em grupo:
 - Os espectros observados são diferentes para cada fonte de luz?
 - Qual a relação entre os espectros e os diferentes elementos químicos?
 - Como esse experimento se relaciona com os conceitos de salto quântico e quantização da energia?

 Sugestões para aplicação da atividade:

- Se possível, peça que alguns estudantes compartilhem suas fotos/vídeos no projetor para comparação coletiva.
- Reforce que a análise espectral é uma ferramenta crucial na ciência, sendo utilizada na astronomia, química e física aplicada.

Produção do Relatório Experimental (5 minutos)

Instruções:

1. Distribua o Roteiro da Construção do Espectrógrafo (APÊNDICE).
 2. Cada grupo deverá produzir um relatório experimental.
 3. Peça que cada grupo responda às perguntas:
 - Como foi o processo de construção do espectrógrafo?
 - Quais diferenças foram observadas nos espectros das diferentes fontes de luz?
 - O que os resultados revelam sobre a composição da luz?
-

- Como os conceitos de quantização de energia e transições eletrônicas ajudam a explicar os espectros obtidos?
4. Os relatórios podem ser entregues na aula seguinte.

Resumo da Aula

Conteúdos abordados:

- Conceitual: Espectros de luz, espectro de emissão e absorção, quantização da energia.
- Procedimental: Construção do espectrógrafo, observação e registro de espectros.
- Atitudinal: Trabalho em pares, desenvolvimento do pensamento investigativo.

Estratégias didáticas:

- Construção experimental de um espectrógrafo caseiro.
- Observação prática dos espectros de luz.
- Análise crítica e produção de relatório.

Sugestão de Avaliação:

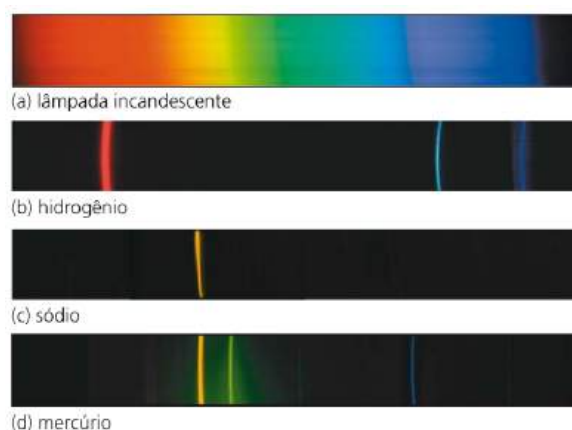
- Avaliação da montagem correta do espectrógrafo e sua funcionalidade.
- Qualidade das observações registradas.
- Clareza na explicação da relação entre espectros e quantização da energia.

MATERIAL DE REFERÊNCIA PARA USO DOCENTE:

Espectrógrafo e estudo dos espectros

Vamos entender melhor o que são as linhas espectrais, que também foram mencionadas como fontes de investigação no tópico anterior. Cada elemento químico possui um padrão único de níveis de energia eletrônicos, o que faz com que emita luz com um **espectro de emissão** característico quando excitado. Alguns exemplos de espectros de emissão podem ser vistos na figura 10 a seguir.

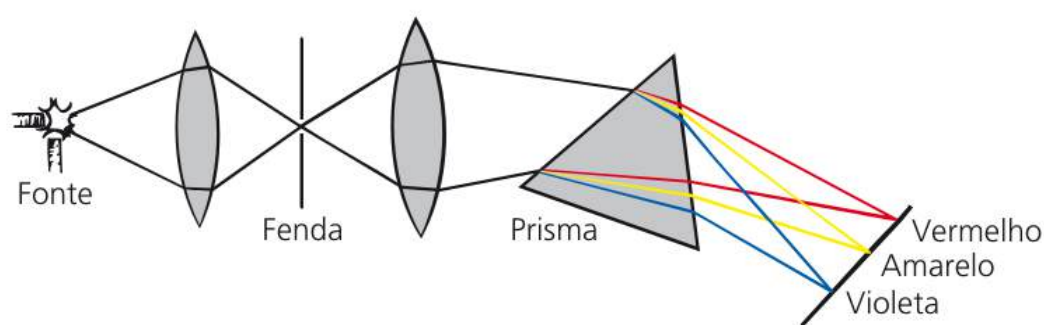
Figura 30 - Espectros de diferentes fontes.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 567).

Este padrão é visível ao passar a luz através de um prisma ou rede de difração, especialmente se a luz primeiro atravessar uma fenda estreita e depois for focada através de um prisma sobre uma tela (Hewitt, 2015, p. 566). Este arranjo de fenda, lente de focagem e prisma (ou rede de difração) forma um espectroscópio, um dos instrumentos mais úteis na ciência moderna e que pode ser visto no esquema da figura 11 a seguir.

Figura 31 - Um espectroscópio simples. As imagens da fenda iluminada são projetadas em uma tela, criando um padrão de linhas. O espectro resultante é específico para a luz que ilumina a fenda.



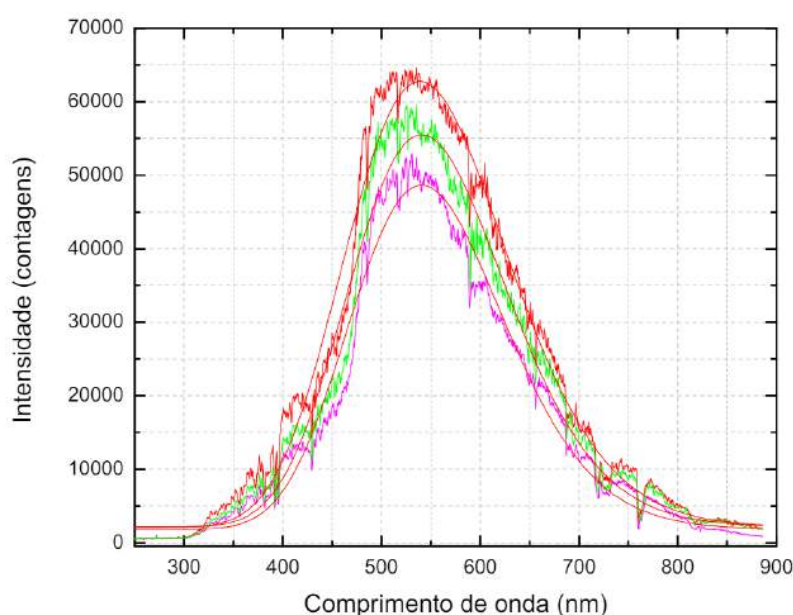
Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 566).

Com a utilização de um espectrógrafo, podemos produzir um gráfico do espectro solar que revela a distribuição da radiação em diferentes comprimentos de onda. Utilizando esse gráfico e aplicando a Lei de Deslocamento de Wien, é possível estimar a temperatura do Sol ao identificar o comprimento de onda no qual ocorre a

emissão máxima de radiação. Dessa forma, a aplicação prática da teoria possibilita a determinação de uma das principais características estelares, como a temperatura da superfície do Sol.

O gráfico apresentado a seguir (figura 12) para o espectro solar foi produzido pelo autor utilizando um espectrógrafo no Laboratório de Física Moderna do IFGW/UNICAMP. No gráfico, três medidas do espectro são exibidas, com a intensidade máxima situada entre 500 nm e 550 nm.

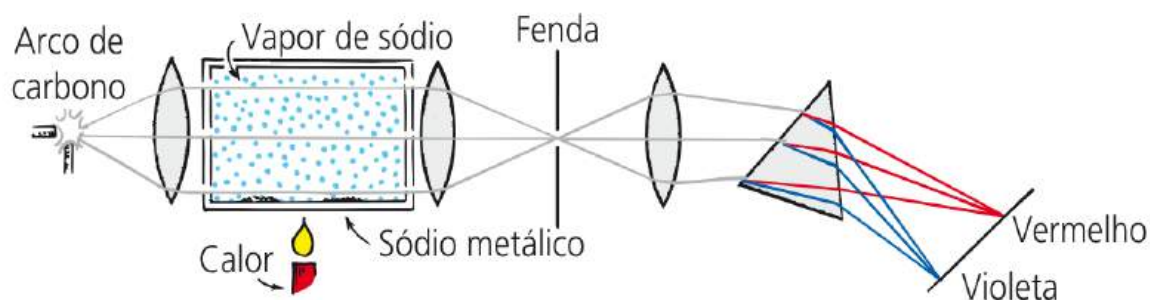
Figura 32 - As três melhores medidas do espectro solar, realizadas às 16h do dia 31/10/2018. As linhas em vermelho são os ajustes utilizando o LogNormal no Origin.



Fonte: Autor.

Quando observamos a luz branca de uma fonte incandescente com um espectroscópio, vemos um espectro contínuo que forma um arco-íris completo de cores. No entanto, se colocarmos um gás entre a fonte e o espectroscópio, um exame cuidadoso revelará que o espectro não é completamente contínuo. Em vez disso, aparece um **espectro de absorção**, no qual linhas escuras são distribuídas ao longo do espectro. Essas linhas escuras, vistas contra o fundo colorido do arco-íris, são como as linhas de emissão em negativo e são chamadas de linhas de absorção. Um arranjo possível pode ser visto na figura 13 a seguir.

Figura 33 - Um arranjo experimental para demonstrar o espectro de absorção de um gás.

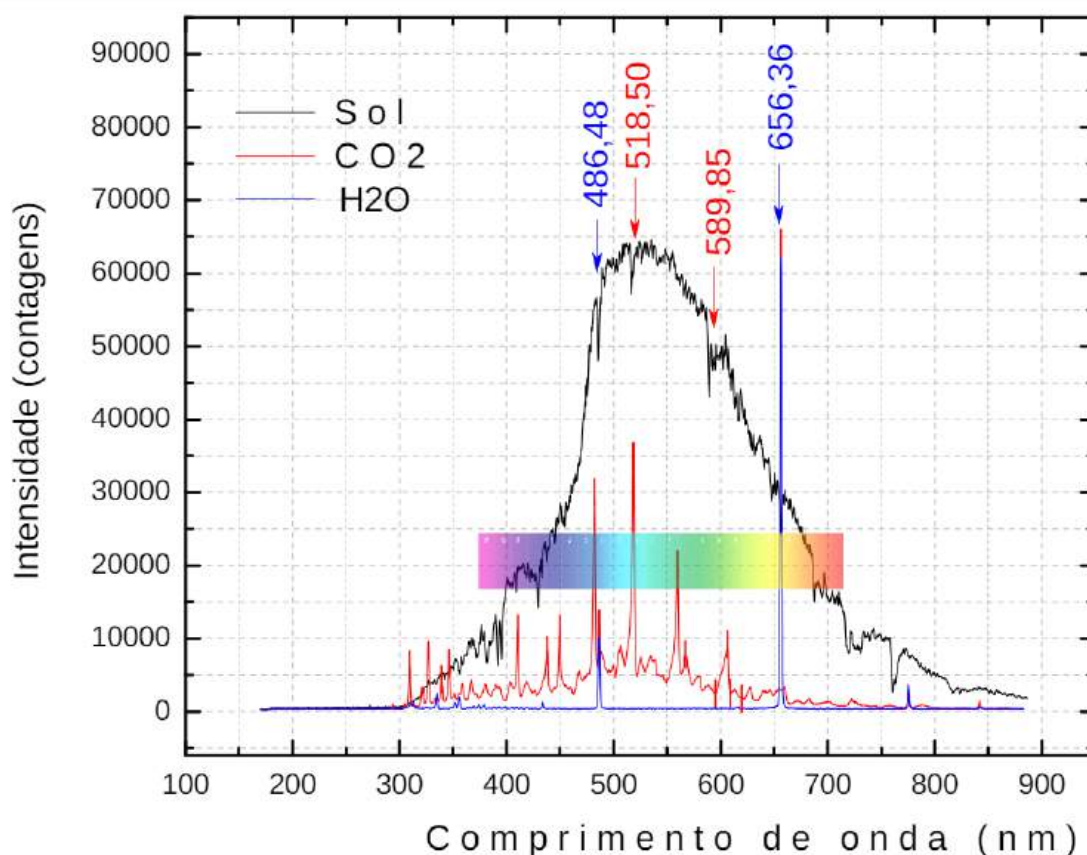


Fonte: Retirado de Hewitt (p.569, 2015).

No espectro observado, essas frequências absorvidas aparecem como linhas escuras, correspondendo exatamente às posições das linhas de emissão do mesmo gás. Embora o Sol seja uma fonte de luz incandescente, seu espectro contém muitas linhas de absorção, chamadas de linhas de Fraunhofer, em homenagem ao óptico e físico Joseph von Fraunhofer. Essas linhas indicam que o Sol e as estrelas possuem uma atmosfera de gases mais frios que absorvem algumas frequências da luz. A análise dessas linhas permite determinar a composição química dessas atmosferas, revelando que os elementos presentes nas estrelas são os mesmos que existem na Terra. Em 1868, análises espectroscópicas do Sol revelaram a existência de hélio, que foi descoberto no Sol antes de ser identificado na Terra (Hewitt, 2015, p.569).

Na figura 14 podemos ver o espectro solar comparado ao espectro visível e com as linhas de absorção do CO_2 e do H_2O . Note que o Sol tem picos negativos correspondente aos comprimentos de onda de 486,48 nm e 656,36 nm, o que significa que o vapor de água presente na atmosfera terrestre absorveu essa energia; os picos negativos do sol correspondente aos comprimentos de onda de 518,50 nm e 589,85 nm significa que o dióxido de carbono presente na atmosfera absorveu a energia desses fótons.

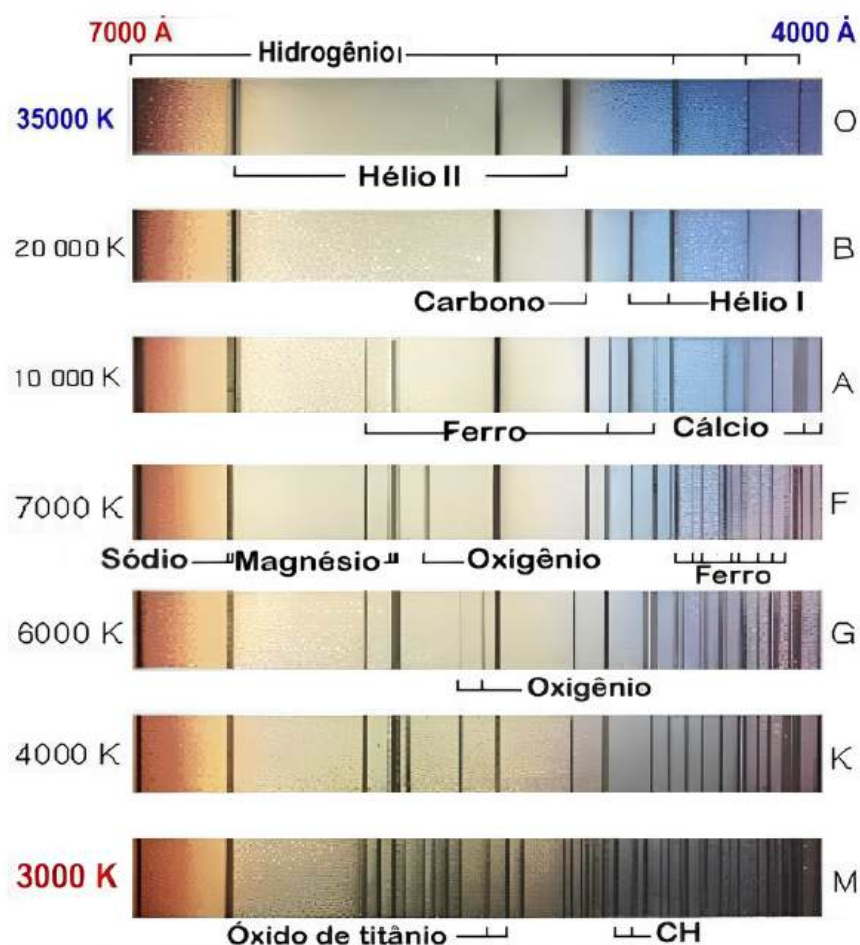
Figura 34 - Em preto: espectro do Sol (16h), em vermelho: espectro do CO₂, em azul: espectro de H₂O, com foque na região do visível.



Fonte: Autor.

O estudo dos espectros, viabilizado pelo uso de espectrógrafos e espectroscópios, é de fundamental importância para a compreensão das propriedades físicas e químicas dos corpos celestes. A análise das linhas espectrais de emissão e absorção permite identificar os elementos presentes em estrelas e atmosferas, revelando informações essenciais sobre sua composição e dinâmica. A precisão dessa metodologia faz do espectro uma "assinatura" única para cada elemento, tornando o estudo espectral uma ferramenta indispensável na astrofísica.

Figura 35 - Espectros em diferentes temperaturas



Fonte: disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/Aula17-132.pdf%E2%80%8B>

O estudo dos espectros, viabilizado pelo uso de espectrógrafos e espectroscópios, é de fundamental importância para a compreensão das propriedades físicas e químicas dos corpos celestes. A análise das linhas espectrais de emissão e absorção permite identificar os elementos presentes em estrelas e atmosferas, revelando informações essenciais sobre sua composição e dinâmica. A precisão dessa metodologia faz do espectro uma "assinatura" única para cada elemento, tornando o estudo espectral uma ferramenta indispensável na astrofísica.

AULA #7

Discussão dos Espectros e Aplicações na Ciência



Objetivos da Aula:

- Analisar e discutir os resultados do experimento dos espectros, comparando diferentes fontes de luz.
- Explorar o uso da espectroscopia para identificar elementos químicos.
- Relacionar o experimento com a natureza ondulatória da luz.
- Relacionar a quantização da energia às linhas espectrais dos átomos.
- Apresentar aplicações da espectroscopia na astrofísica e química, incluindo o caso do Sol.

Recursos necessários:

- Projetor ou TV multimídia (para exibição dos espectros observados).
- Microsoft Forms ou questionário impresso (Questionário Pós-Atividade do Espectrógrafo).

Apresentação dos Resultados Experimentais (15 minutos)

Instruções:

1. Projete imagens dos espectros capturados pelos estudantes na aula anterior.
2. Compare os espectros das diferentes fontes de luz utilizadas:
 - Luz branca (fluorescente, LED, RGB).
 - Luz ultravioleta (UV).
 - Fontes de gás (argônio, mercúrio, hidrogênio).

3. Pergunte aos estudantes:

- Quais diferenças e semelhanças vocês observaram entre os espectros?
- Como a luz branca se diferencia da luz emitida por lâmpadas de gás?
- Como a fluorescência e o salto quântico explicam a emissão de determinadas cores?

Espectroscopia e Identificação de Elementos - caso do Sol (15 minutos)

Instruções:

1. Apresente a técnica de espectroscopia, explicando que cada elemento químico possui um "código de barras" espectral único.
2. Relacione o experimento do espectrógrafo com a natureza ondulatória da luz.
3. Mostre espectros reais do hidrogênio, hélio e mercúrio, destacando suas linhas espectrais. As fotos a seguir foram feitas pelo autor no laboratório LF-47 do IFGW no dia 31/10/2018.

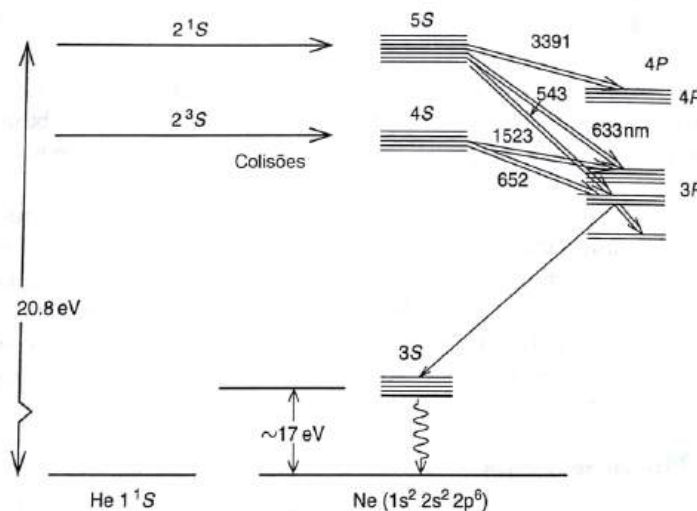
Figura 36 - (esq.) Foto tirada da lâmpada de Argônio e Mercúrio submetida a 5 kV
(dir.) Foto tirada da lâmpada de Hidrogênio submetida a 5 kV.



Fonte: Autor

4. Explique sobre as séries (Lyman, Balmer e Paschen), associando-as aos diferentes saltos quânticos no átomo de hidrogênio.

Figura 37 - Níveis de energia do Hélio e Neônio. As principais transições são indicadas por setas duplas. Note que o estado fundamental está em uma energia muito menor.



Fonte: (Eisberg, Resnick, 1979)

5. Relacione a análise espectral com aplicações práticas, como:
 - Identificação de elementos químicos na tabela periódica.
 - Determinação da composição química de estrelas e planetas.
 - Uso da espectroscopia em exames médicos e análises laboratoriais.
6. Mostre como os elementos químicos do Sol foram descobertos através da espectroscopia, incluindo o hélio, identificado antes mesmo de ser encontrado na Terra.
7. Relacione a Lei de Wien com a temperatura das estrelas, usando o exemplo do gráfico gerado no IFGW/UNICAMP.
8. Apresente um espectro do Sol, destacando as linhas de absorção causadas por elementos como hidrogênio, hélio, oxigênio e CO_2 .
9. Mostre o gráfico gerado pelo professor para determinar a temperatura do Sol com base na Lei de Wien.
10. Proponha que os estudantes façam o cálculo da temperatura do Sol. Forneça os dados necessários.
11. Pergunte aos estudantes:
 - Como a cor de uma estrela pode indicar sua temperatura?
 - Como a espectroscopia ajuda a entender a formação do universo?

- Por que estrelas mais quentes são azuladas e estrelas mais frias são avermelhadas?

Questionário Pós-Atividade (20 minutos)

Instruções:

1. Distribua o Questionário Pós-Atividade do Espectrógrafo.
2. Dê 20 minutos para os estudantes responderem individualmente às questões, como:
 - Quais diferenças e semelhanças foram observadas entre os espectros das lâmpadas fluorescente, RGB e UV?
 - Como um espectrógrafo funciona?
 - Como a espectroscopia pode ser usada para identificar elementos químicos em estrelas?
 - Qual a relação entre a cor de uma estrela e sua temperatura?

Resumo da Aula

 Conteúdos abordados:

- Conceitual: Espectros de luz, linhas espectrais, espectroscopia atômica, séries, Lei de Wien.
- Procedimental: Discussão dos espectros observados, análise da composição dos elementos.
- Atitudinal: Trabalho em pares, reflexão crítica sobre a importância da espectroscopia.

 Estratégias didáticas:

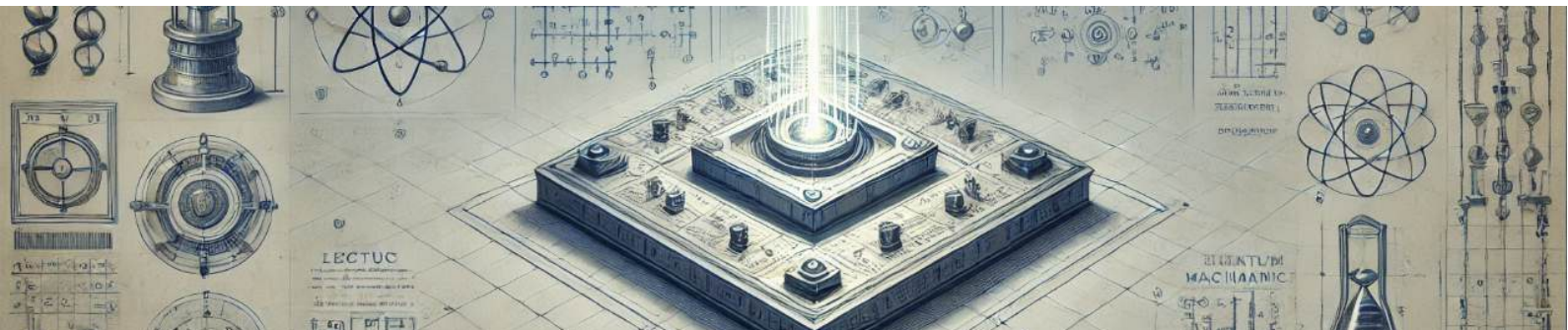
- Análise comparativa de espectros observados pelos estudantes.
- Apresentação de espectros reais de elementos químicos.
- Aplicação da espectroscopia na identificação da composição do Sol.

 Sugestão de Avaliação:

- Participação ativa na discussão dos espectros observados.
 - Clareza na interpretação e comparação dos espectros apresentados.
-

AULA #8

Efeito Fotoelétrico



📌 Objetivos da Aula:

- Discutir os limites de aplicação da Física Quântica, diferenciando os regimes clássico e quântico.
- Apresentar o efeito fotoelétrico, suas implicações e a explicação dada por Einstein.
- Desenvolver habilidades matemáticas na resolução de problemas aplicados à teoria quântica.

📌 Recursos necessários:

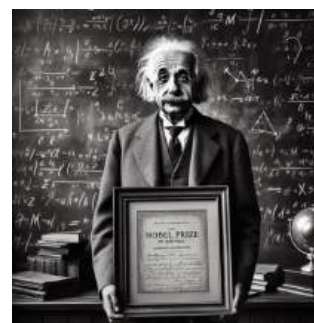
- Projetor ou TV multimídia (para exibição do vídeo e do simulador).
- Simulador PHET – Efeito Fotoelétrico disponível em: [PHET Colorado](#).
- Vídeo “Efeito Fotoelétrico - O Nobel de Einstein”, disponível em: [YouTube - Universo Narrado](#).

Introdução à Aula – O que é o Efeito Fotoelétrico? (20 minutos)

Instruções:

1. Retome o assunto do espectrógrafo e o comportamento ondulatório da luz. Pergunte aos estudantes: "A luz se comporta como partícula?". Faça uma discussão inicial.
2. Apresente o efeito fotoelétrico, descrevendo os experimentos iniciais de Hertz e Stoletov.

3. Apresente o trabalho de Einstein (1905) e como ele explicou o efeito fotoelétrico.
4. Exiba o vídeo [“Efeito Fotoelétrico - O Nobel de Einstein”](#), incentivando os estudantes a anotarem os pontos principais.



 Sugestões para aplicação da atividade:

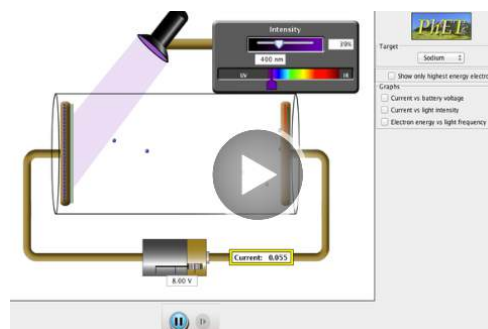
- Relacione o efeito fotoelétrico com aplicações modernas, como células fotovoltaicas, sensores de câmeras digitais e painéis solares.
- Pergunte: "O que aconteceria se tentássemos explicar esse fenômeno apenas com a teoria ondulatória da luz?"

Simulação Interativa do Efeito Fotoelétrico (15 minutos)

Instruções:

1. Acesse e projete o [Simulador PHET – Efeito Fotoelétrico](#).

Figura 38 - Simulador PHET para o efeito fotoelétrico.



Fonte: disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric.

2. Demonstre como modificar:
 - O tipo de material do alvo (sódio, zinco, platina, etc.).
 - A frequência da luz incidente.
 - A intensidade da luz.
3. Peça que os estudantes anotem suas observações ao variar cada parâmetro.
4. Pergunte:

- O que acontece quando usamos luz com frequência abaixo do limite do material?
- Como a intensidade da luz afeta o número de elétrons ejetados?
- Como esse experimento valida a equação de Einstein $E = h\nu - W$?



Sugestões para aplicação da atividade::

- Explique que o trabalho de saída (W) representa a energia mínima necessária para ejetar um elétron.
- Conecte o fenômeno ao princípio da quantização da energia.
- **VÍDEO** com experimento do Efeito Fotoelétrico:

 Tema 01 - Luz | Experimentos - Efeito fotoelétrico

https://youtu.be/VVka6Mp5vyA?si=3mLeqwpfft_Fc8RX



Discussão guiada e fechamento (15 minutos):

Instruções:

1. Promova uma breve discussão com perguntas como: “O que muda quando aumentamos a intensidade da luz?”, “Por que a frequência é mais importante que a intensidade nesse fenômeno?”, “Quais seriam as limitações da teoria ondulatória nesse caso?”.
2. Finalize com uma recapitulação dos principais conceitos e destaque algumas aplicações do efeito fotoelétrico no cotidiano, como nas células fotovoltaicas e sensores de imagem.

Resumo da Aula



Conteúdos abordados:

- Conceitual: Efeito fotoelétrico, fótons, quantização da energia, comprimento de onda de de Broglie.
- Procedimental: Exploração do simulador PHET, cálculos do comprimento de onda de partículas.

- Atitudinal: Trabalho em pares, aplicação da teoria a situações concretas.

 Estratégias didáticas:

- Aula expositiva com exemplos históricos e experimentais.
- Exploração interativa do simulador PHET.
- Cálculo do comprimento de onda de de Broglie para diferentes partículas.
- Discussão sobre a transição entre o comportamento clássico e quântico.

 Sugestão de Avaliação:

- Participação na exploração do simulador PHET.
- Precisão nos cálculos do comprimento de onda de de Broglie.
- Capacidade de relacionar os conceitos discutidos com aplicações do cotidiano.

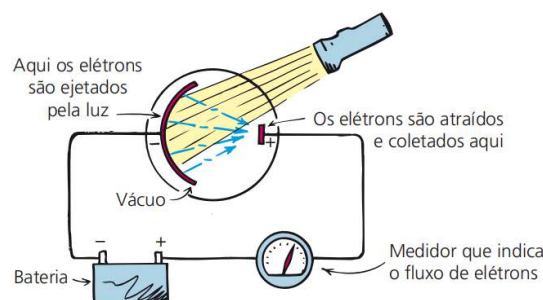
TEXTOS BASE PARA AULA:

1905 e o artigo de Einstein sobre o efeito fotoelétrico

A primeira observação relacionada ao efeito fotoelétrico foi feita pelo físico russo Alexander Stoletov (1839-1896), em 1872. Entre os anos de 1886 e 1887, Heinrich Hertz realizou experimentos que confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas e corroboraram a teoria de Maxwell sobre a natureza da luz (Eisberg, Resnick, 1979). Hertz observou experimentalmente que a descarga elétrica entre dois eletrodos era facilitada pela incidência de luz ultravioleta em um deles.

A figura 7 a seguir mostra um esquemático mais atual usado para estudar o efeito fotoelétrico. Uma luz monocromática incide sobre uma placa de metal e libera elétrons, chamados de *fotoelétrons*.

Figura 39 - Um esquema experimental usado para observar e medir o efeito fotoelétrico.



Fonte: Retirado de Hewitt (2015, p. 488).

Eisberg e Resnick (1979) destacam três pontos principais do efeito fotoelétrico que não podem ser explicados pela teoria ondulatória clássica da luz:

i) A energia cinética máxima dos fotoelétrons não depende da intensidade da luz. A teoria ondulatória clássica requer que a amplitude do campo elétrico oscilante E da onda luminosa aumente se a intensidade da luz for aumentada. Isso sugere que a energia cinética dos fotoelétrons deveria também aumentar com o aumento da intensidade do feixe luminoso, porém isso não é observado experimentalmente.

ii) O efeito fotoelétrico só ocorre acima de uma frequência mínima específica, independentemente da intensidade, chamada frequência de corte. De acordo com a teoria ondulatória, o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência de luz, desde que tivesse uma intensidade mínima para ejetar os elétrons. Entretanto, experimentos mostram que, para cada superfície, há um limiar de frequência característico.

iii) Na teoria ondulatória, a energia luminosa está uniformemente distribuída sobre a frente de onda. Portanto, se a luz for suficientemente fraca, deveria haver um intervalo de tempo mensurável entre o instante em que a luz começa a incidir sobre a superfície e a ejeção do fotoelétron. No entanto, a absorção de energia da luz ocorre em uma área limitada e em um tempo muito curto, contrariando a distribuição uniforme esperada. Nenhum retardamento detectável foi medido.

Em 1905 Einstein publica no periódico *Annalen der Physik* o artigo que hoje é conhecido como um estudo sobre o efeito fotoelétrico - emissão pela matéria de elétrons em movimento devido à interação com uma radiação (Martins,Rosa, 2014).

Assim, uma radiação eletromagnética passou a ser tratada como um feixe de partículas denominadas *fótons* propagando-se.

Einstein supôs que a energia de um fóton (quantum) é localizada e que pode ser calculada por:

$$E = h.f \quad (3.6)$$

A equação (3.7) do efeito fotoelétrico relaciona energia cinética máxima ($K_{\text{máx}}$) do fotoelétron emitido com a energia do fóton incidente e uma energia característica do metal chamada *função trabalho* (w_0). A função trabalho é a energia mínima necessária para um elétron “escapar” do metal.

$$K_{\text{máx}} = h.f - w_0 \quad (3.7)$$

Segundo Martins e Rosa (2014, p. 44), Einstein propõe que “[...] a radiação só poderia ser emitida e absorvida pela matéria através de quantidades bem definidas de energia $h.f$ e a própria luz seria constituída por esses *quanta de energia*”. Essa proposta de Einstein pode ser encarada como um modelo corpuscular para a natureza da luz.

Em 1911, ocorreu o primeiro Congresso Solvay de Física, inteiramente dedicado à questão dos *quanta*. Em 1912, após o congresso, Henri Poincaré publicou trabalhos sobre o assunto, e em 1913, Niels Bohr aplicou essa ideia em sua teoria sobre o átomo (Martins, Rosa, 2014).

Segundo Santos (2018), Robert Andrews Millikan dedicou mais de uma década a experimentos sobre o efeito fotoelétrico e obteve, pela primeira vez, um valor experimental para a constante de Planck. Ele determinou h com uma precisão de aproximadamente 0,5%, valor muito próximo do obtido a partir da fórmula da radiação de Planck. Seu trabalho de 1916, relacionado à medição experimental da constante de Planck no efeito fotoelétrico, foi fundamental para a conquista do Prêmio Nobel de Física em 1923.

Após a confirmação experimental da proposta de Einstein por Millikan, Albert Einstein foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1921, pela explicação teórica do efeito fotoelétrico (Eisberg, Resnick, 1979).

AULA #9

Limites da Teoria Quântica e Dualidade Onda-Partícula



Objetivos da Aula:

- Explorar a dualidade onda-partícula e o Princípio da Complementaridade de Bohr.
- Introduzir o conceito de ondas de matéria de de Broglie e seus limites de aplicação.
- Relacionar os conceitos teóricos com aplicações práticas, como microscopia eletrônica.
- Demonstrar, por meio de cálculos, as diferenças de escala entre o comprimento de onda de partículas subatômicas e objetos macroscópicos.

Recursos necessários:

- Projetor ou TV multimídia (para exibição de imagens e cálculos).

Introdução à Aula – A luz é onda ou partícula? (15 minutos)

Instruções:

1. Recapitule as aulas anteriores, destacando as evidências do comportamento ondulatório e do comportamento corpuscular da luz. Em seguida, escreva no quadro a pergunta: “Afim, a luz é onda ou partícula?” e proponha que os estudantes debatam suas respostas.
2. Explique que essa foi uma das questões mais intrigantes da Física Moderna e que existem diversas interpretações para esse problema. Uma das

possibilidades de resposta envolve o Princípio da Complementaridade, proposto por Bohr em 1928.

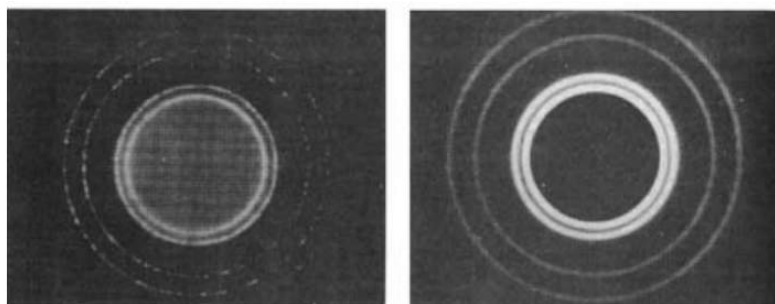
3. Apresente o Princípio da Complementaridade de Bohr, explicando que a luz pode se comportar ora como onda, ora como partícula, dependendo do experimento realizado.
4. Pergunte aos estudantes:
 - Em quais situações a luz se comporta como onda?
 - Em quais situações a luz se comporta como partícula?
 - Esse princípio se aplica apenas à luz ou também a partículas materiais?
5. Relacione a dualidade onda-partícula com os experimentos estudados anteriormente, como efeito fotoelétrico (partícula) e difração e interferência (onda).

Introdução ao Comprimento de Onda de de Broglie (10 minutos)

Instruções:

1. Apresente o questionamento de Louis de Broglie (1924):
 - Se a luz, que é considerada uma onda, pode se comportar como partícula, então partículas materiais também poderiam apresentar características ondulatórias? Explique que Louis de Broglie propôs que toda partícula em movimento tem um comprimento de onda associado.
2. Explique a equação de de Broglie.
3. Apresente como exemplo o comprimento de onda de um elétron em movimento. Explique que os elétrons podem exibir padrões de interferência semelhantes aos das ondas eletromagnéticas, confirmando a ideia de ondas de matéria.
4. Pergunte:
 - "Por que não percebemos o comportamento ondulatório em objetos macroscópicos?"
 - "O que determina se um objeto apresenta efeitos quânticos?"

Figura 40 - Figuras de difração para (a) feixe incidente de raios-X, enquanto em (b) temos o feixe composto por elétrons.



Fonte: Castilho et al. (2005, p. 528).

Atividade Prática – Calculando o Comprimento de Onda de de Broglie (20 minutos)

Instruções:

1. Divida os estudantes em pares e forneça a para referência:
 - Massa de um elétron:
 - Velocidade típica de um elétron em um átomo:
2. Proponha que os estudantes calculem o comprimento de onda de de Broglie, apresentando as seguintes situações:
 - “Para entender por que não observamos o comportamento ondulatório de corpos macroscópicos no cotidiano, utilize sua própria massa corporal e estime sua velocidade durante uma corrida leve. **Calcule o comprimento de onda associado.**”
 - “Agora, considere um elétron se movendo a 2% da velocidade da luz. **Calcule o comprimento de onda associado.**”
3. Após os cálculos, discuta os resultados:
 - Qual é a ordem de grandeza do comprimento de onda para cada caso?
 - Por que os elétrons apresentam comportamento ondulatório, enquanto pessoas e objetos grandes não?
 - Como isso está relacionado aos limites de aplicação da Física Quântica?

Conclusão e Reflexão Final (5 minutos)

Instruções:

1. Pergunte:
 - O que aprendemos sobre os limites da Física Quântica?
 - Como esse conhecimento impacta o avanço da ciência e tecnologia?

Resumo da Aula

 Conteúdos abordados:

- Conceitual: Princípio da Complementaridade de Bohr, ondas de matéria de de Broglie, dualidade onda-partícula.
- Procedimental: Cálculo do comprimento de onda de de Broglie para diferentes partículas.
- Atitudinal: Trabalho em pares, reflexão sobre os limites da Física Quântica.

 Estratégias didáticas:

- Pergunta motivadora para estimular a curiosidade dos estudantes.
- Explicação expositiva sobre dualidade onda-partícula e ondas de matéria.
- Cálculos práticos para demonstrar a aplicabilidade da teoria.
- Discussão sobre aplicações tecnológicas da Física Quântica.

 Sugestão de Avaliação:

- Precisão nos cálculos do comprimento de onda de de Broglie.
- Clareza na explicação da dualidade onda-partícula.
- Participação ativa na discussão e reflexão final.

MATERIAL DE REFERÊNCIA PARA USO DOCENTE:

Ondas de matéria de de Broglie

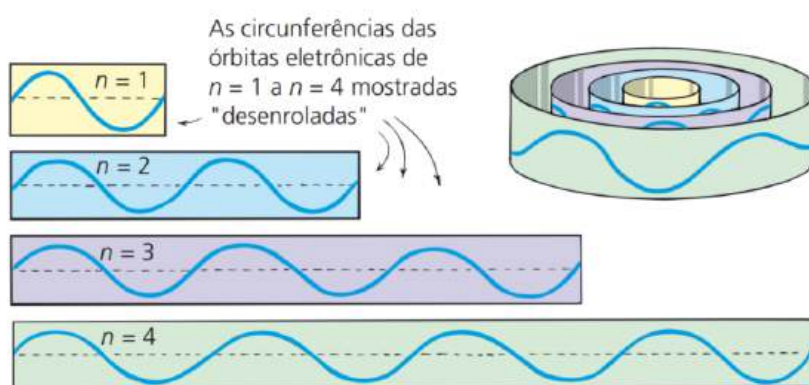
As discussões do físico experimental Maurice de Broglie sobre a natureza corpuscular da luz encantaram seu irmão Louis de Broglie e o inspiraram trocar de carreira, mudando da História para Física. Em 1924, Louis de Broglie publicou sua tese de doutorado na qual apresentou a hipótese das **ondas de matéria**, que

sofrieriam os mesmos fenômenos das outras ondas, como reflexão, difração e interferência. A razão para que o elétron ocupe apenas níveis discretos de energia é compreendida considerando-se que ele se comporte como uma onda, e não como uma partícula (Eisberg, Resnick, 1979).

Segundo Eisberg e Resnick (1979), a hipótese de de Broglie era de que o comportamento dual da radiação também se aplicava à matéria. Ou seja, se um fóton tem uma onda associada, uma partícula material, como um elétron, também tem associada a ela uma onda de matéria que governa seu movimento.

De Broglie demonstrou que os valores discretos dos raios das órbitas de Bohr são uma consequência natural de “ondas de elétrons” estacionárias. Ele mostrou que existe uma órbita de Bohr na qual uma onda eletrônica se fecha sobre si mesma, tornando-se uma onda estacionária, como em uma corda vibrante de um instrumento musical. Nessa visualização, o elétron não é concebido como uma partícula localizada em um ponto específico no interior do átomo, mas como uma onda estacionária ao redor do núcleo atômico, com um número inteiro de comprimentos de onda ajustando-se exatamente às circunferências das órbitas (Hewitt, 2015). Esta ideia do número inteiro de comprimento de onda pode ser exemplificada - de forma simplificada - no esquema da Figura 15 a seguir.

Figura 41 - Esquema simplificado para ilustrar as órbitas eletrônicas de um átomo que possuem raios discretos, porque as suas circunferências são números múltiplos inteiros do comprimento de onda do elétron.



Fonte: Retirado de Hewitt (p.569, 2015).

De Broglie propôs que para qualquer corpo em movimento existe um comprimento de onda λ associado, que depende da massa relativística m e velocidade v . Essa equação - chamada relação de De Broglie - pode ser vista a seguir. Ela calcula o comprimento de onda de De Broglie.

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (3.8)$$

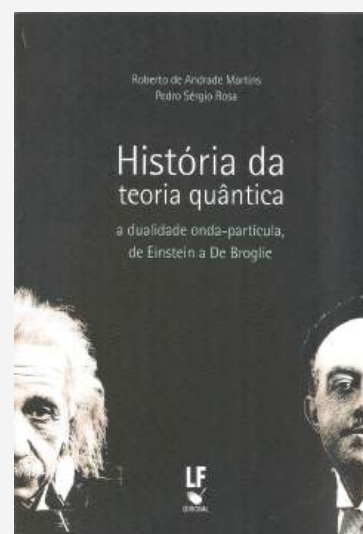
Assim, a cada comprimento de onda de um fóton está associada uma intensidade de sua quantidade de movimento (p). Em 1927, a teoria foi confirmada pela primeira vez em um experimento no qual se determinou o comprimento de onda de elétrons que sofreram difração. Ou seja, foram detectados comportamentos ondulatórios em elétrons (Biscuola, Doca, Villas Bôas, 2012).

Segundo Eisberg e Resnick (1979), essa onda associada à matéria é observada apenas no limite quântico, para corpos muito pequenos. Por exemplo, para um elétron com energia cinética de 100 eV, temos um comprimento de onda $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-10}$ m. Já para uma bola de beisebol, movendo-se a uma velocidade de 10 m/s, o $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-35}$ m. Ou seja, para corpos com massas “grandes”, o comprimento de onda associado é extremamente pequeno, o que limita a extensão de aplicação dos conceitos quânticos.

Neste momento a Física Quântica pode parecer confusa devido ao comportamento dual das partículas. Ondas luminosas, que produzem interferência e sofrem difração, entregam energia como “pacotes” corpusculares, os *quanta*. Elétrons, que se movem em linhas retas e colidem como partículas, formam padrões de interferência como ondas. Esse comportamento gera um conflito na explicação da natureza da luz, pois ela parece exibir uma natureza tanto corpuscular quanto ondulatória. Contudo, há uma ordem subjacente: luz e elétrons exibem características de onda e partícula. Niels Bohr formulou a ideia de **complementaridade**, segundo a qual os fenômenos quânticos exibem propriedades complementares (mutuamente exclusivas) – revelando-se como partículas ou como ondas – dependendo do tipo de experimento que esteja sendo realizado, nunca exibindo os dois comportamentos ao mesmo tempo (Biscuola, Doca, Villas Bôas, 2012).

LEITURA COMPLEMENTAR:

Para aprofundar o entendimento histórico e conceitual sobre a dualidade onda-partícula e teoria de De Broglie, recomendamos o livro *História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie*, de **Roberto de Andrade Martins** e **Pedro Sérgio Rosa**. A obra apresenta uma narrativa detalhada sobre o desenvolvimento da Teoria Quântica, excelente recurso para professores interessados em contextualizar historicamente os conteúdos trabalhados em sala de aula.



AULA #10

Reflexão e Questionário Final



Objetivos da Aula:

- Revisar os principais conceitos trabalhados ao longo da sequência didática.
- Avaliar o impacto das atividades no aprendizado e no pensamento crítico dos estudantes.
- Refletir sobre a experiência de ensino e aprendizagem, identificando pontos positivos e aspectos a melhorar.
- Aplicar um questionário final para medir a evolução dos estudantes em relação ao tema.

Recursos necessários:

- Questionário final impresso ou digital (APÊNDICE).
- Quadro ou projetor para organizar a discussão dos pontos positivos e desafios.
- Notas ou registros das atividades anteriores (para auxiliar na reflexão coletiva).

Reflexão sobre o Ensino de Física Quântica (10 minutos)

Instruções:

1. Pergunte à turma: "Vocês acham que Física Quântica deveria ser mais abordada no Ensino Médio? Por quê?"
2. Relacione as respostas com as dificuldades de ensino de Física Moderna no Brasil, explicando que há poucos materiais voltados para professores.

3. Destaque como a Física Quântica se aplica ao dia a dia, reforçando que entender seus princípios pode evitar a disseminação de pseudociências.
4. Pergunte: "Após essa sequência didática, vocês se sentem mais preparados para diferenciar ciência de pseudociência?".
5. Reforce que a Física Quântica não é só uma teoria abstrata, mas uma base para diversas tecnologias modernas.
6. Agradeça a participação dos estudantes nas atividades.

Aplicação do Questionário Final (35 minutos)

Instruções:

1. Distribua o questionário final (APÊNDICE) impresso ou disponibilize digitalmente via Microsoft Forms.
2. Explique que o questionário inclui:
 - Questões conceituais, cobrindo os principais tópicos da Física Quântica estudados.
 - Questões reflexivas, onde os estudantes devem expressar suas opiniões sobre o ensino da Física Quântica.
 - Perguntas sobre pseudociência, para avaliar o impacto da sequência no pensamento crítico dos estudantes.

Considerações Finais e Agradecimentos (5 minutos)

Instruções:

1. Agradeça a participação ativa dos estudantes e elogie o engajamento nas atividades práticas e discussões.
 2. Pergunte: "Se vocês tivessem que explicar Física Quântica para alguém que nunca ouviu falar, o que diriam?"
 3. Relacione essa resposta com a importância de divulgar o conhecimento científico de forma responsável e combater a desinformação.
 4. Finalize ressaltando que a Física Quântica não é apenas uma teoria complexa, mas uma área que revolucionou a ciência e a tecnologia.
-

Resumo da Aula

Conteúdos abordados:

- Conceitual: Revisão dos principais conceitos da sequência didática.
- Procedimental: Reflexão crítica sobre o aprendizado e aplicação do questionário final.
- Atitudinal: Desenvolvimento do pensamento científico e avaliação do impacto da sequência didática.

Estratégias didáticas:

- Discussão coletiva sobre os aprendizados e desafios.
- Reflexão sobre o ensino de Física Quântica no Ensino Médio.
- Aplicação do questionário final para avaliação da evolução dos estudantes.

Sugestão de Avaliação:

- Participação ativa na roda de conversa.
- Qualidade das respostas no questionário final.
- Reflexões críticas sobre a importância da Física Quântica no Ensino Médio.

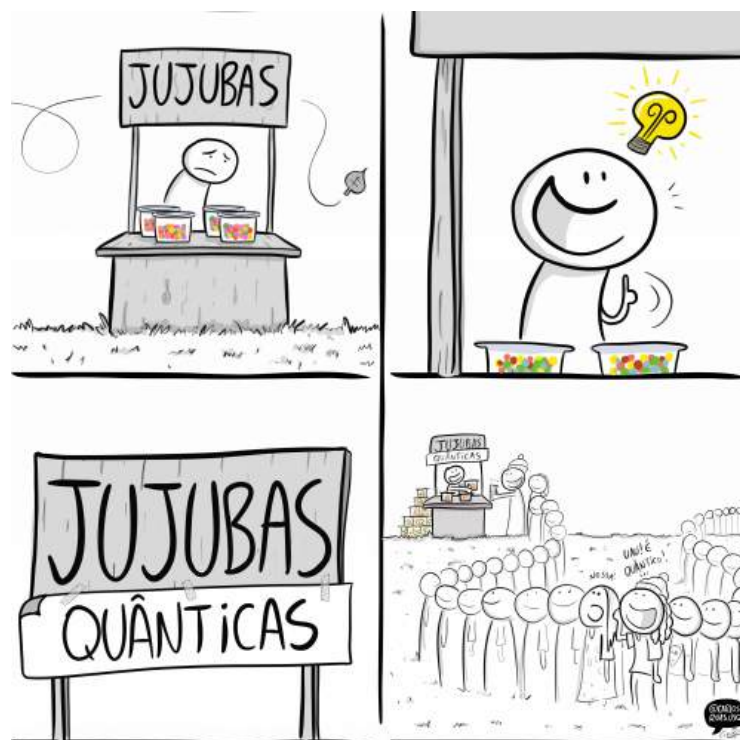
QUESTIONÁRIO FINAL (SUGESTÕES DE QUESTÕES)

1. Já assistiu a algum filme, série ou jogo que menciona a Física quântica? Descreva essa situação e explique de que forma ela influencia a compreensão desse tema pela sociedade.

2. As folhas de uma árvore, quando iluminadas pela luz do Sol, mostram-se verdes porque:

- a) refletem difusamente a luz verde do espectro solar;
- b) absorvem somente a luz verde do espectro solar;
- c) refletem difusamente todas as cores do espectro solar, exceto o verde;
- d) difratam unicamente a luz verde do espectro solar;
- e) a visão humana é mais sensível a essa cor.

3. Pseudociência e uso indevido da Física Quântica



disponível em: <https://www.umsabadoqualquer.com/tag/quanticas/>

a) Você já viu ou ouviu falar de produtos, terapias ou serviços anunciados como "baseados em princípios da Física Quântica"? Caso sim, descreva um exemplo e explique, com base nos conceitos discutidos em aula, em que medida esse uso se aproxima ou se distancia da Física Quântica real. Indique eventuais equívocos presentes na forma como o termo "quântico" é utilizado.

b) Abaixo está um exemplo fictício de propaganda:

"Este colar quântico alinha suas energias, harmoniza seus chakras e fortalece o seu campo eletromagnético com a força dos elétrons vibrando em alta frequência."

Com base nos conhecimentos adquiridos sobre Física Quântica, explique por que essa propaganda pode ser considerada pseudocientífica. Aponte quais elementos do discurso se afastam dos conceitos científicos da Física e justifique por que o uso do termo "quântico" nesse contexto é inadequado.

4. Supondo que no interior de uma sala haja três objetos de cores distintas: verde, azul e vermelho. De que cor, respectivamente, veremos esses objetos se essa sala for iluminada por uma luz de cor azul?

- a) Azul, azul e roxo;
- b) Verde, azul e roxo;
- c) Preto, azul e preto;
- d) Todos azuis;
- e) Branco, azul e branco.

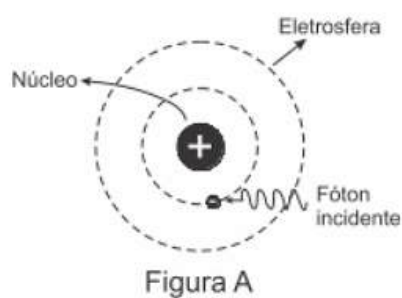
5. Em nossas aulas discutimos sobre terapias ou práticas de cura que afirmam usar a Física quântica. A partir das discussões realizadas em aula dê sua opinião sobre tais práticas.

6. A tecnologia utilizada no sistema WEEDit para pulverização localizada é bastante inteligente. O sistema de sensores realiza a leitura da área, emitindo uma luz vermelha de alta intensidade para detectar plantas vivas indesejadas, conforme imagem ao lado. Um conjunto de sensores realiza leituras com uma frequência de 40 mil vezes por segundo. A clorofila das plantas responde à luz vermelha emitida pelo sensor absorvendo-a e emitindo luz NIR (infravermelho próximo) através da fluorescência, emissão que é detectada pelos sensores. Os sensores WEEDit identificam mesmo as menores emissões de clorofila e reagem acionando o conjunto de bicos referente à planta identificada, aplicando apenas o necessário, de acordo com o tamanho da planta.



Disponível em: <http://smartsensingbrasil.com.br/index.html>. [Adaptado]. Acesso em: 25 out. 2017.

O modelo atômico de Bohr pode ser utilizado para explicar a absorção da luz vermelha pela clorofila e a emissão da luz NIR, considerando a luz como fótons, conforme figura A abaixo.



- a) Desenhe a posição do elétron depois que o fóton incidiu sobre o átomo (figura A). Explique o que ocorreu.

- b) Desenhe a energia absorvida do fóton incidente sendo liberada e a posição do elétron após essa liberação. Explique o que ocorreu.

7. Como estudante do ensino médio, o que você acha que poderia ser feito em sala de aula para esclarecer equívocos comuns sobre a Física quântica? Como professores podem tornar esses conceitos mais acessíveis e compreensíveis para todos?

8. A natureza da luz é uma questão que preocupa os físicos há muito tempo. No decorrer da história da Física, houve predomínio ora da teoria corpuscular - a luz seria constituída de partículas - ora da teoria ondulatória - a luz seria uma onda.

- a) Descreva a concepção atual sobre a natureza da luz.
- b) Descreva, resumidamente, uma observação experimental que sirva de evidência para a concepção descrita no item anterior.

9. Muitas vezes, ouvimos falar sobre a ideia de "saltos quânticos" sendo usada em contextos que podem não ter base científica. Você já encontrou alguma situação em que o termo "salto quântico" foi usado de maneira incorreta ou exagerada fora do contexto da Física quântica? Descreva essa situação e explique por que você acredita que essa aplicação do termo pode ser considerada pseudocientífica. Como podemos distinguir entre o uso correto na Física e sua utilização equivocada em outros contextos?

10. Leia o enunciado abaixo, sobre as órbitas eletrônicas.

“As órbitas eletrônicas em torno dos núcleos atômicos devem conter um número inteiro N de comprimentos de onda de Broglie do elétron.”

Considere as seguintes afirmações sobre o enunciado acima.

- I. Ele evidencia o comportamento onda-partícula do elétron.
- II. Ele assegura que as órbitas eletrônicas são sempre circunferências.
- III. Ele define o número quântico N que identifica a órbita ocupada pelo elétron.

Quais estão corretas?

- a) Apenas I.
- b) Apenas II.
- c) Apenas I e III.
- d) Apenas II e III.
- e) I, II e III.

Texto para a próxima questão:

A Relação entre a Teoria das Cores e Fenômenos Quânticos na Observação de Cores

A teoria das cores RGB baseia-se na mistura aditiva de três cores de luz (vermelho, verde e azul) para criar a percepção de várias cores pelo olho humano. Este modelo explica como percebemos cores sob a iluminação padrão. Contudo, alguns fenômenos de emissão de luz, como a fluorescência e a fosforescência, apresentam características que vão além da simples mistura de luz visível. Estes fenômenos são comumente observados em materiais 'neon' sob certas condições de iluminação.

A fluorescência e a fosforescência ocorrem quando substâncias específicas absorvem fótons de luz e reemitem essa luz após um breve período, mas com uma energia diferente daquela inicialmente absorvida, resultando em cores vibrantes e, muitas vezes, na faixa do ultravioleta, não visíveis ao olho humano sem ajuda.

11. Com base no texto e em seus conhecimentos, responda:

- a) Explique, com base nos princípios da mecânica quântica, por que a teoria das cores RGB é insuficiente para descrever completamente os fenômenos da fluorescência e da fosforescência.
 - b) Descreva o processo pelo qual as tintas 'neon' são capazes de emitir luz visível quando expostas à luz ultravioleta e como isso se relaciona com os conceitos de níveis de energia e transições eletrônicas na Física quântica.
-

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este material foi desenvolvido como um recurso didático voltado a professores do Ensino Médio interessados em introduzir a Física Quântica de maneira acessível, crítica e contextualizada. A sequência didática propõe uma abordagem investigativa e interdisciplinar, permitindo que os estudantes construam conhecimento por meio da experimentação, da análise de fenômenos e da discussão fundamentada, diferenciando conceitos científicos de interpretações pseudocientíficas.

A proposta está fundamentada na perspectiva construtivista de Zabala (1998), que reconhece o papel das sequências didáticas como estruturas organizadoras da aprendizagem. Essa abordagem favorece o desenvolvimento progressivo da compreensão conceitual, articulando saberes prévios com os novos conteúdos de maneira significativa. A estrutura modular adotada permite ao professor adaptar o material conforme as especificidades da turma, oferecendo flexibilidade sem comprometer a coerência do percurso formativo. Mais do que um roteiro rígido, o material deve ser compreendido como uma proposta aberta, passível de adequações conforme o contexto escolar, os recursos disponíveis e as escolhas pedagógicas de cada docente.

Um dos diferenciais deste trabalho é a incorporação de discussões críticas sobre pseudociência e misticismo quântico, cada vez mais presentes em conteúdos midiáticos e em discursos que distorcem o conhecimento científico. Ao promover o letramento científico e incentivar a análise crítica de fontes de informação, o material também atua na formação cidadã dos estudantes, fortalecendo sua autonomia intelectual diante de fenômenos culturais contemporâneos.

Espera-se, assim, que este produto educacional contribua para enriquecer o ensino de Física Moderna no Ensino Médio, oferecendo ferramentas concretas para explorar conceitos quânticos de forma conectada à realidade dos estudantes. Que ele possa inspirar novas práticas pedagógicas e fomentar o interesse pela ciência de maneira crítica, reflexiva e socialmente relevante.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.

BISCUOLA, Gualter José; DOCA, Ricardo Helou; VILLAS BÔAS, Newton. **Tópicos de Física**: Volume 3. 18. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

CASTILHO, C. M. C. de; NASCIMENTO, V. B.; SOARES, E. A.; ESPERIDIÃO, A. S. C.; MOTA, F. B.; CARVALHO, V. E. de. Difração de elétrons de baixa energia (LEED) e a determinação da estrutura atômica de superfícies ordenadas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 527-543, 2005. Disponível em: <https://www.sbfisica.org.br/rbef>. Acesso em: 21 out. 2024.

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **Física Quântica**: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Tradução de João da Silva. São Paulo: Edgard Blücher, 1979.

GRIFFITHS, David. J. **Mecânica Quântica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.

GRIFFITHS, David J. **Eletrodinâmica**. Tradução de Heloisa Coimbra de Souza. 3. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.

HEWITT, PAUL G. **Física conceitual**. Tradução de Trieste Freire Ricci. Revisão técnica de Maria Helena Gravina. Porto Alegre: Bookman, 2015.

MARTINS, Roberto de Andrade; ROSA, Pedro Sérgio. **História da teoria quântica**. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

NEWTON, ISAAC. **Óptica**: Sir Isaac Newton. Tradução, introdução e notas de André Koch Torres Assis São Paulo: Universidade de São Paulo, 2017.

PESSOA JUNIOR, OSVALDO. O fenômeno cultural do misticismo quântico. **Teoria quântica**: estudos históricos e implicações culturais. Tradução. Campina Grande: EdUEPB, 2011. Acesso em: 20 out. 2022.

PESSOA JUNIOR, OSVALDO. **Conceitos de Física quântica**: Vol. 1. 4. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2019.

SANTOS, Carlos Alberto dos. Millikan e a questão do potencial de contato no experimento do efeito fotoelétrico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 40, n. 3, e3602, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0321>. Acesso em: 5 mar. 2025

SÃO PAULO. Secretaria da Educação do Estado de São Paulo. União dos Dirigentes Municipais de Educação do Estado de São Paulo. **Currículo Paulista** (Versão 1). São Paulo: SEE-SP/UNDIME-SP, 2018. Disponível em <https://efape.educacao.sp.gov.br/curriculopaulista/>. (Acesso em 29/06/2022).

SAITO, Marcia Tiemi. O fenômeno cultural do misticismo quântico: possibilidades e perspectivas de investigação. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, Passo Fundo, v. 4, ed. especial, p. 1101-1129, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5335/rbecm.v4i3.12903>. Acesso em: 09 mar. 2025.

STUDART, Nelson. A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Carlos, v. 22, n. 4, p. 523, dez. 2000.

VILAS BOAS, Newton; DOCA, Ricardo Helou; BISCUOLA, Gualter José. **Tópicos de Física** - Vol. 2 - Termologia, Ondulatória e Óptica. 19. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

VIVIANI, Vadim R.; BECHARA, Etelvino J. H. Um Prêmio Nobel por uma Proteína Brilhante. **Química Nova**, n. 30, novembro 2008. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/27361101/quimica-nova-na-escola-nov-2008/7>. Acesso em: 23/05/2024.

ZABALA, Anteni **A prática educativa: como ensinar**. Porto Alegre: Artes Médicas Sul Ltda., 1998.

APÊNDICE

MODELO DE RELATÓRIO
NÚCLEO DE ESTUDOS DE Física BÁSICA

TÍTULO DO TRABALHO

NOMES DOS INTEGRANTES DO GRUPO
2º SÉRIE DO ENSINO MÉDIO

CAMPINAS- SP
DATA (MÊS/ANO)

INTRODUÇÃO

Insira aqui uma introdução sobre o tema que será apresentado no relatório. podem fazer uma breve descrição da atividade, introduzir os conceitos principais que serão apresentados.

OBJETIVOS

Descrever brevemente quais foram os objetivos da atividade realizada.

MATERIAIS

Faça uma descrição de todos os materiais necessários. exemplo:

- papel;
- caneta;
- lâmpada rgb;

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Aqui devem ser registrados os detalhes da realização do experimento. Expliquem quais as técnicas e procedimentos utilizados.

DADOS EXPERIMENTAIS

Aqui devem ser registrados resultados experimentais.

CONCLUSÕES

No encerramento devem analisar os resultados, realizar comparações e discussões para chegarem às conclusões.

REFERÊNCIAS

Colocar as referências do trabalho.

ROTEIRO EXPERIMENTAL DA ATIVIDADE DESENHOS E CORES

UM ESTUDO DA TEORIA DAS CORES E SALTO QUÂNTICO

Em grupos, os estudantes devem realizar um desenho colorido e investigar seu comportamento quando submetidos à diferentes fontes de luz. numa sala escura, irão colocar o desenho sob diferentes formas de luz: 3 cores do espectro visível (vermelho, verde e azul – rgb) e uma luz ultravioleta (uv) – conhecida popularmente como “luz negra”. Devem registrar os desenhos ao longo do processo com fotos para fazer a análise futura. também devem registrar com foto as pinturas corporais com “tintas neon” que foram submetidas à luz negra.

Uma discussão sobre os resultados encontrados deverá ser feita em torno de observações e dados coletados.

Roteiro da atividade

Segue o roteiro das atividades que devem ser desenvolvidas ao longo das aulas. Esse roteiro deverá ser realizado com diferentes desenhos possibilitando assim um estudo comparativo para discussão e conclusões.

1. Produzir dois desenhos coloridos utilizando duas técnicas diferentes: pontilhismo e traços contínuos.
 - a. mínimo de 3 cores.
 - b. temas para fundamentar o desenho:
 - i. “o que é a realidade?”
 - ii. “o que é a matéria?”
2. Submeter ao desenho à diferentes luzes na sala escura e fotografar. mínimo de 3 cores (rgb) e luz negra.
3. Utilizar as tintas “neon” para pintura corporal (ou no papel) e submeter à luz negra. Fotografar os processos e resultados.

Após as etapas na sala escura, devem elaborar um relatório para responder as seguintes perguntas:

1. Compare as fotos do desenho na luz branca com as observadas com os desenhos sob luzes coloridas e responda: percebe alguma diferença nos desenhos? descreva suas observações.
 2. Compare agora os desenhos na luz branca com as observações na luz uv – “luz negra” e responda: percebe alguma diferença nos desenhos? descreva suas observações.
 3. As pinturas com tinta neon “brilham” quando submetidos à quais fontes de luz? explique os motivos e diferenças observadas.
 4. Pesquise sobre salto quântico e faça um pequeno resumo sobre os resultados encontrados.
 5. A teoria das cores (clássica) explica todos os fenômenos observados?
 6. Qual a relação do brilho observado com a luz uv e salto quântico?
-

ROTEIRO DA CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÓGRAFO

UM ESTUDO DO ESPECTRO DA LUZ ATRAVÉS DA CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRÓGRAFO PARA CELULAR

Em grupos, os estudantes devem construir um espectrógrafo – conforme modelo – para analisar o espectro da luz emitida por diferentes fontes. Ao analisarmos a luz podemos ver suas diferentes composições de frequências – cores. com isso objetivamos estudar o funcionamento do espectrógrafo e as diferentes composições da luz.

Materiais necessários

Para realizar a atividade são necessários os seguintes itens:

- folha sulfite preta
- cd/dvd velho para servir de grade de difração.
- estilete
- fita adesiva
- câmera digital (celular)

Roteiro da Atividade

Segue o roteiro das atividades que devem ser desenvolvidas ao longo das aulas. Esse roteiro deverá ser realizado com diferentes fontes de luz possibilitando assim um estudo comparativo para discussão e conclusões.

1. Construir um espectrógrafo conforme o modelo apresentado (ou similar) e utilizá-lo anexado à uma câmera digital.
2. Apontar o espectrógrafo para diferentes fontes de luz e registrar as imagens observadas (fotos).

fontes de luz:

- a. sol
 - b. lâmpada fluorescente
 - c. rgb
 - d. luz negra
 - e. ou outras
-

3. Explicar os resultados observados e realizar comparações entre os espectros.

Escrever um relatório conforme o modelo em anexo explicando o funcionamento do espectrógrafo e respondendo as seguintes perguntas:

1. compare as fotos do espectro da luz branca com o espectro da lâmpada fluorescente e da rgb. observaram diferenças? descrevam as observações.
 2. compare agora com o espectro da luz uv. descrevam as observações. houve alteração?
 3. quais as possíveis aplicações de um espectrógrafo?
-

INSTRUÇÕES E MODELO DE ESPECTRÓGRAFO

1 • cut and fold
Cut along the outer edge. Fold up or down as indicated by the dotted and dashed lines. All labels should stay on the outside.

2 • make a diffraction grating from a DVD-R
A diffraction grating is a series of close slits that disperse light.

3 • attach to a webcam, phone, or laptop
The spectrometer can be mounted on a camera phone, laptop, or with the help of a box, attached to a webcam. Line up carefully so that the rainbow is in the middle of the image, and tape down firmly so that the spectrometer stays rigid.

To make one from a DVD-R, split it into quarters, peel off the reflective layer and trim a small clean square out of the transparent layer. Try to pick a clean piece without fingerprints or scratches.

To work as a diffraction grating the DVD-R must be placed so that its grating is vertical, making a horizontal spectral rainbow. Tape your DVD piece to the inside of the spectrometer's door, then tape or glue the door closed.

Except for the diffraction grating door, glue or tape all flaps down onto the outside.

reading spectra
Every molecule emits only certain frequencies of light, and under the right conditions a spectrometer can detect these as rainbow bands. With two clear bands, the mercury in compact fluorescents makes calibration easy.

front view with door open
back view with door open
tape down
close door

PublicLaboratory.org
SpectralWorkbench.org
Mini-spectrometer
Public Lab Foldable

Assembly instructions and usage at:
PublicLaboratory.org/wiki/foldable-spec

Join up, calibrate, & share spectra
Go online to Spectralworkbench.org, follow the calibration instructions, and you'll be ready to upload calibrated spectra!

Don't forget to share and publish your research as Research Notes on Publiclaboratory.org, and ask questions through the Public Laboratory Spectrometry mailing list.

This open hardware design was developed by Public Lab contributors; You are free to reproduce, share, & distribute with attribution.

MODELO DE ESPECTRÓGRAFO

