



BRUNO FERNANDES GARCIA

**DISCUTINDO CONCEITOS DE FÍSICA
MODERNA COM OS ESTUDANTES DOS
PERÍODOS INICIAIS DO CURSO DE
LICENCIATURA EM FÍSICA DA UFLA**

LAVRAS – MG

2019

BRUNO FERNANDES GARCIA

**DISCUTINDO CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA COM OS
ESTUDANTES DOS PERÍODOS INICIAIS DO CURSO DE
LICENCIATURA EM FÍSICA DA UFLA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do Curso de
Licenciatura em Física, para a obtenção do título de
Licenciado em Física.

Prof. DSc. Iraziet da Cunha Charret
Orientadora

LAVRAS – MG

2019

Para citar este documento:

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Biblioteca Universitária. **Discutindo Conceitos de Física Moderna com os Estudantes dos Períodos Iniciais do Curso de Licenciatura em Física da UFLA**. 1. ed. Lavras, 2019.

**Ficha catalográfica elaborada pela Coordenadoria de Processos Técnicos
da Biblioteca Universitária da UFLA**

Garcia, Bruno Fernandes

Discutindo Conceitos de Física Moderna com os Estudantes dos Períodos Iniciais do Curso de Licenciatura em Física da UFLA / Bruno Fernandes Garcia, Iraziet da Cunha Charret. 1^a ed. – Lavras : UFLA, 2019.

196 p. : il.

Monografia de Graduação (Licenciatura)–Universidade Federal de Lavras, 2019.

Orientadora: Prof. DSc. Iraziet da Cunha charret.

Bibliografia.

1. Física Moderna e Contemporânea. 2. Análise Temática. 3. Formação Inicial. 4. Ensino de Física. 5. Pré - Requisitos. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-808.066

A reprodução e a divulgação total ou parcial deste trabalho são autorizadas, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

A minha mãe, Angela pelo apoio constante.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciências Exatas, pela oportunidade.

A CAPES e ao CNPq pelas bolsas concedidas ao longo de minha graduação.

Às Escolas Estaduais, suas direções, administrações e funcionários: Firmino Costa, Azarias Ribeiro, Tiradentes e Cinira Carvalho.

À orientadora Prof. Iraziet da Cunha Charret pelo acompanhamento, auxílio e demais discussões.

Aos demais professores do curso de Licenciatura Plena em Física pelo apoio constante e auxílio durante o curso.

A todos funcionários do DEX/UFLA.

Aos meus pais, Angela e Juscelino pelo amor e apoio incondicional, e aos meus irmãos Pedro Henrique, André Fernandes e Gustavo Fernandes.

À Ana Karla, pelo companheirismo, amor, apoio em todos os momentos e singular torcida.

Aos meus amigos da Universidade Federal Fluminense, Pólo de Volta Redonda, Daniel Gonzaga e Denimara Dias pelo apoio constante e amizade.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

MUITO OBRIGADO!

Para sempre é composto de agoras
(Emily Dickinson).

RESUMO

O presente trabalho consiste na análise e reflexão das discussões realizadas dentro de seis aulas de uma hora e quarenta minutos cada, que foram construídas no formato de um minicurso, abordando algumas das temáticas de Física Moderna e Contemporânea e que foi desenvolvido com estudantes do 2º período do curso de Licenciatura em Física da UFLA. Dentro desse minicurso, o objetivo é verificar a aplicabilidade e qual a verdadeira necessidade dos pré-requisitos exigidos, usualmente, para a abordagem desses tópicos, além de ser uma forma de aguçar a curiosidade e motivar os estudantes a permanecerem no curso, visto que estes tópicos só serão aprofundados nos períodos finais do curso de graduação. Também foi feita uma investigação acerca de alguns pré-requisitos necessários, nos quais os estudantes apresentam defasagens conceituais, avaliando-se quais deles são de fato importantes, para se inserir e discutir FMC. Dentre estes tópicos estão: tópicos de ondulatória, eletromagnetismo, limites da física clássica, entre outros. Foram utilizados questionários, com questões específicas, com o intuito de identificar para cada encontro e tema, os problemas específicos apresentados pelos estudantes. Essas atividades foram desenvolvidas nas aulas de uma disciplina introdutória com alunos ingressantes do curso de licenciatura em física, em consenso com o professor responsável, que permitiu o seu desenvolvimento. Trabalhos e pesquisadores na área indicam que é importante inserir e discutir tópicos de FMC desde cedo na formação dos estudantes, mesmo no Ensino Médio, apontando como justificativas: o contato com o mundo da pesquisa atual em física, as indicações dos documentos oficiais sobre a reformulação dos conteúdos abordados nas aulas de física no ensino médio, a atração de jovens para a carreira acadêmica e a possibilidade de discutir os conhecimentos que a ciência e a tecnologia proporcionam à população. Além disso, indicam também que os temas de FMC são os que mais influenciam os estudantes na escolha de Física para suas futuras profissões. Assim, a temática das aulas foi construída com o objetivo de investigar, se é possível desenvolver e discutir FMC sem a necessidade de se ter conhecimentos específicos formais prévios. Verificou-se que é possível isso, porém em algumas atividades, ficou evidente que há a necessidade de pré-requisitos, bem como um tempo maior para discussões posteriores. Também, a partir dos questionários, foi realizado uma breve reflexão de suas aplicações e analisados, de forma a relacionar com o objetivo do trabalho. Por fim, deseja-se que este seja um material de apoio para professores do ensino médio, de forma a ser um material de formação continuada e que inspire o uso em sala de aula, com o potencial de ser uma maneira de instigar e alimentar a curiosidades dos estudantes, de forma a continuarem no curso de física e que reflitam sobre o uso de tais temas no ensino de física em suas vidas profissionais futuras.

Palavras-chave: Física Moderna e Contemporânea, Análise Temática, Formação Inicial, Ensino de Física e Pré-Requisitos

ABSTRACT

The present work consists in the analysis and reflection of the discussions held within six one-hour and forty-minute classes, which were built in the form of a short course, addressing some of the themes of Modern and Contemporary Physics and which was developed with students from 2^o *circ* period of UFLA Physics Degree course. Within this short course, the objective is to verify the applicability and the real necessity of the prerequisites usually required to approach these topics, as well as to stimulate curiosity and motivate students to stay in the course, as they topics will only be explored in the final periods of the undergraduate course. An investigation was also made about some necessary prerequisites, in which the students present conceptual lags, evaluating which ones are really important to insert and discuss FMC. These topics include: wave topics, electromagnetism, the limits of classical physics, among others. Questionnaires were used, with specific questions, in order to identify for each meeting and theme, the specific problems presented by the students. These activities were developed in the classes of an introductory subject with students entering the undergraduate physics course, in consensus with the responsible teacher, which allowed their development. Studies and researchers in the area indicate that it is important to insert and discuss topics of FMC early in the formation of students, even in high school, pointing as justifications: the contact with the current world of physics research, the indications of the official documents about the reformulation. the contents covered in high school physics classes, the attraction of young people to the academic career and the possibility of discussing the knowledge that science and technology provide to the population. In addition, they also indicate that the themes of FMC are the ones that most influence students in choosing physics for their future professions. Thus, the theme of the classes was built in order to investigate whether it is possible to develop and discuss FMC without having to have prior formal specific knowledge. It was found that this is possible, but in some activities it became evident that there is a need for prerequisites as well as a longer time for further discussions. Also, from the questionnaires, a brief reflection of their applications was performed and analyzed, in order to relate to the objective of the work. Finally, it is hoped that this will be a support material for high school teachers in order to be a continuing education material that inspires classroom use, with the potential to be a way of instigating and nurturing curiosities of the students, in order to continue in the physics course and to reflect on the use of such subjects in the teaching of physics in their future professional lives.

Keywords: Modern and Contemporary Physics, Thematic Analysis, Initial Formation, Physics Teaching and Prerequisites

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de uma onda eletromagnética, destacando-se os campos elétrico e magnético, bem como a direção de propagação.	37
Figura 2.2 – Representação da propagação unidimensional de uma onda ξ na direção do eixo horizontal x	38
Figura 2.3 – Representação de uma Onda Eletromagnética Plana.	47
Figura 2.4 – Representação para uma Onda Eletromagnética Harmônica.	53
Figura 2.5 – Esquema representando uma cavidade que simula um corpo negro.	58
Figura 2.6 – Comparação entre a previsão teórica e os resultados experimentais para a emissão de um corpo negro e uma certa temperatura	60
Figura 2.7 – Modelo do aparato experimental para se estudar o efeito fotoelétrico.	65
Figura 2.8 – Dados coletados a partir da variação da tensão, para diferentes fontes luminosas.	66
Figura 2.9 – Medidas de Millikan	70
Figura 2.10 – Aparato experimental moderno usado para investigar descargas elétricas em tubos evacuados. (a) motor elétrico que aciona a (b) câmara de expansão	77
Figura 2.11 – O experimento de Rutherford	79
Figura 4.1 – Disposição das latas e da fonte de calor para a realização do experimento de aquecimento das latinhas	114
Figura 4.2 – Lei de Rayleigh-Jeans comparada com os dados experimentais para a emissão de um corpo aquecido a uma certa temperatura.	135

Figura 4.3 – Dados da emissão de um corpo negro na temperatura da superfície do Sol (à esquerda) e de uma lâmpada incandescente (à direita), obtidos com o uso do PhET. Disponível em: < https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/blackbody-spectrum >.	136
Figura 4.4 – Dados da emissão de um corpo negro na temperatura ambiente (à esquerda) e de um forno convencional (à direita), obtidas com o uso do PhET. Disponível em: < https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/blackbody-spectrum >.	137
Figura 4.5 – Tela inicial do simulador virtual PhET para o Efeito Fotoelétrico.	152
Figura 4.6 – Bolinhas de gude incidindo em uma fenda simples (à direita) e em uma fenda dupla (à esquerda).	168
Figura 4.7 – Perturbações em uma superfície aquosa incidindo em uma fenda simples (à direita) e em uma fenda dupla (à esquerda).	168
Figura 4.8 – Os quatro elementos da natureza segundo Aristóteles.	179
Figura 4.9 – Expectativas e resultados da experiência do espalhamento de partículas alfa.	183
Figura 4.10 – O esperado para o modelo de "bolo de passas".	184
Figura 4.11 – O experimento para o modelo de Rutherford.	184
Figura 4.12 – O experimento para o modelo de Rutherford, porém analisado através de seu núcleo, no qual há a concentração de carga positiva.	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Variação de escalas de tamanhos para diversos corpos dentro do nosso universo, do muito pequeno ao muito grande.	30
Tabela 2.2 – Equações de Maxwell para o Campo Eletromagnético.	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Descrição das atividades desenvolvidas no minicurso, com especificação dos seus objetivos, conteúdos e metodologias.	87
Quadro 4.1 – Detalhamento da atividade 1, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa da atividade.	92
Quadro 4.2 – Detalhamento da atividade 2, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa da atividade.	113
Quadro 4.3 – Síntese da atividade 3, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa.	131
Quadro 4.4 – Descrição da atividade 4, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa da atividade.	147
Quadro 4.5 – Descrição da atividade 5, apresentando a duração prevista e uma discussão de cada etapa.	167
Quadro 4.6 – Descrição da atividade 6, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa da atividade.	176

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	TÓPICOS DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA – UMA BREVE DISCUSSÃO	29
2.1	Escalas de Tamanho do Universo	29
2.2	Contextualização Sócio-Histórica	31
2.3	Ondas Eletromagnéticas	35
2.3.1	Ondas	35
2.3.2	Análise de uma propagação	38
2.3.3	Intensidade de uma onda	40
2.3.4	Equação Diferencial para o Movimento Ondulatório	41
2.3.5	Ondas Eletromagnéticas	44
2.3.5.1	Equações de Maxwell	44
2.3.5.2	Ondas Eletromagnéticas Planas	46
2.3.5.3	Energia	53
2.4	Radiação de Corpo Negro – Constante de Planck	55
2.4.1	Calor e Temperatura	55
2.4.2	Radiação Térmica	56
2.4.3	Radiação do Corpo Negro	57
2.4.3.1	Teoria de Planck	61
2.5	O Efeito Fotoelétrico	64
2.5.1	Einstein e o Efeito Fotoelétrico	68
2.5.2	Análise sobre o Experimento de Millikan	69
2.6	Dualidade Onda Partícula – Atividade 5	72
2.7	Modelos Atômicos	75
2.7.1	Modelo de Thomson	76
2.7.2	Modelo de Rutherford	78
2.7.3	Modelo de Bohr	80

3	METODOLOGIA	83
3.1	Os Três Momentos Pedagógicos	83
3.2	Contexto da Pesquisa	85
3.3	Análise Temática	88
4	RELATOS E REFLEXÕES	91
4.1	Atividade 1 - Do Mundo Macro ao Mundo Micro: uma discussão embasada no contexto histórico	91
4.1.1	Momento 1	92
4.1.2	Momento 2	96
4.1.3	Momento 3	98
4.1.4	Análise das Respostas ao Questionário	98
4.1.5	Algumas reflexões	109
4.2	Atividade 2 – Interação Radiação Matéria: o problema da Radiação do Corpo Negro	112
4.2.1	Momento 1	113
4.2.2	Momento 2	115
4.2.3	Momento 3	119
4.2.4	Análise das Respostas ao Questionário	119
4.2.5	Algumas Reflexões	127
4.3	Atividade 3 – Constante de Planck e o problema da Radiação do Corpo Negro	130
4.3.1	Momento 1	131
4.3.2	Momento 2	133
4.3.3	Momento 3	140
4.3.4	Análise da Produção dos Estudantes	140
4.3.5	Algumas Reflexões	143
4.4	Atividade 4 – O Efeito Fotoelétrico	146
4.4.1	Momento 1	147

4.4.2	Momento 2	152
4.4.3	Análise das Respostas ao Questionário	155
4.4.4	Algumas Reflexões	163
4.5	Atividade 5 – Dualidade Onda Partícula	166
4.5.1	Momento 1	167
4.5.2	Momento 2	170
4.5.3	Momento 3	170
4.5.4	Análise das Respostas ao Questionário	171
4.5.5	Algumas Reflexões	174
4.6	Atividade 6 - Modelos Atômicos: Estabilidade e seus postulados	175
4.6.1	Momento 1	176
4.6.2	Momento 2	178
4.6.3	Momento 3	187
4.6.4	Algumas Reflexões	188
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	191
	REFERÊNCIAS	195

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho abordamos, inicialmente, uma síntese do contexto histórico e do desenvolvimento conceitual produzido a partir das descobertas e propostas apresentadas no final do século XIX e início do século XX, para explicar alguns fenômenos que envolviam a interação da radiação com a matéria e que deram origem a chamada Física Quântica.

Como são temas ausentes das salas de aulas do ensino médio, como apontam vários pesquisadores da área, foi pensamos inicialmente na elaboração de um trabalho para investigar alguns dos possíveis motivos para essa realidade. Porém, ao estudarmos as pesquisas que lidam com esse tema, percebemos que um dos motivos para essa ausência são as considerações referentes aos pré-requisitos exigidos para se desenvolver tais temas. A hipótese levantada por nós é que todos que tenham curiosidade sobre os fenômenos de FMC e de como a Física desenvolveu e construiu explicações para este universo, são capazes de compreender conceitualmente esta nova Física. Portanto, nesse sentido, o trabalho busca investigar essa problemática a partir de alguns dos tópicos que deram a origem ao que denominamos de Física Moderna e Contemporânea.

Em um segundo momento, e levando em conta esses estudos, elaboramos e desenvolvemos um conjunto de atividades com os licenciandos do curso de Licenciatura em Física da UFLA que estavam ainda no ciclo básico, isto é, ainda não haviam tido contato com a chamada Física Moderna. Essa escolha de público-alvo se deu porque a ideia era verificar a aplicabilidade de atividades que discutem alguns conceitos de Física Moderna para um conjunto de estudantes que não possuem os pré-requisitos que, em geral, são exigidos para se discutir tais temas.

A partir da realização deste conjunto de atividades, queremos discutir e fazer uma análise sobre as possíveis dificuldades conceituais que impedem e/ou dificultam a aprendizagem de conceitos de física moderna pelos estudantes que

estão nas fases iniciais da formação, apontando, se possível, algumas propostas de solução.

Portanto, o objetivo geral do presente trabalho é:

- Verificar se é possível a discussão e construção de tópicos de FMC sem a necessidade de pré-requisitos e concepções formais.

O trabalho também possui alguns objetivos específicos:

- Elaborar uma proposta de minicurso abordando tópicos de FMC considerando os pré - requisitos exigidos usualmente;
- Desenvolver a proposta de minicurso com um grupo de estudante iniciantes no curso de licenciatura em física;
- Analisar e verificar as concepções iniciais que os estudantes possuem e que obtiveram em seus ensinos médios, de forma a identificar os pré - requisitos mínimos;
- Introduzir temas de FMC na fase inicial de formação do licenciando, de forma a aguçar suas curiosidades e discutir o mundo da pesquisa em física;
- Ser um material de apoio e de aplicação em sala de aula, para professores, tanto do ensino médio como de disciplinas iniciais de um curso de graduação em física.

Foram selecionados os seguintes tópicos para serem abordados nestas discussões:

- Radiação de corpo negro;
- Efeito fotoelétrico;
- Dualidade onda-partícula;

- Modelos atômicos.

Após os estudos iniciais, foi desenvolvida uma proposta de material didático acessível aos professores do ensino médio e aos professores das disciplinas iniciais da formação de professores de Física, que possa ser usada para gerar as discussões sobre os temas da chamada Física Moderna e Contemporânea em sala de aula, considerando os tópicos associados ao surgimento da física quântica, principalmente.

Esse material foi desenvolvido com o grupo de estudantes da graduação em física em uma série de aulas, dentro da disciplina de Introdução à Licenciatura em Física B (GEX190), disciplina ministrada no segundo período do curso. Portanto, em uma etapa em que esses estudantes ainda não tiveram contato com o tema no curso, sendo possível avaliar quais dos conteúdos foram vistos anteriormente, ou seja, no Ensino Médio e quais foram as principais dificuldades ao longo do processo.

A seguir, será dada uma breve descrição do que foi desenvolvido em cada atividade, de forma a destacar os tópicos construídos e discutidos. Porém, apesar de parecer seguir uma sequência, no qual uma aula é posterior à outra ou que uma necessita dos pré - requisitos da anterior, isso não é verdade, apenas as atividades 2 e 3 é que são sequenciais. Fica a cargo do usuário (leitor, professor...???) qual atividade usar, pois, conforme verá, elas não são complementares.

A primeira atividade foi desenvolvida de forma a introduzir a proposta do trabalho, identificar os conhecimentos iniciais e justificar socio-historicamente o surgimento dessa área da física, que é a Física Moderna e Contemporânea. Além disso, neste encontro também foram discutidas as principais diferenças entre a física clássica e física moderna, para que nos próximos encontros os estudantes tivessem o entendimento básico de que estamos estudando fenômenos que a física clássica, que estudaram até então, não é suficiente para dar explicações científicas.

Na segunda atividade, que teve como objetivo introduzir um dos primeiros problemas, que é a interação da radiação com a matéria foi desenvolvido a partir de uma atividade experimental, na qual os alunos deveriam analisar as temperaturas para diferentes objetos iguais, com diferentes cores. A partir dos dados, eles deveriam desenvolver uma explicação para o fenômeno. Após essa atividade experimental, foram apresentados alguns tópicos de física ondulatória e de termodinâmica. Isso foi feito de forma que eles apresentassem uma resposta mais formal, identificando a relação entre essas grandezas no experimento.

A terceira atividade discutiu o espectro de radiação térmica, levando em contas as grandezas estudadas no encontro anterior. Foi apresentado um pouco do contexto histórico e tecnológico, que envolvia a produção de aço e, dentro dessa situação, foi colocado o problema da medição de temperatura dos fornos das siderúrgicas. A partir desse problema, introduziu-se as teorias que tentavam respondê-lo, de forma que os alunos identificassem que a física clássica não dava uma resposta satisfatória para as observações experimentais.

Na quarta atividade foi discutido outro fenômeno, o efeito fotoelétrico, no qual a física clássica novamente se deparava com dados para os quais não conseguia encontrar resposta satisfatória. Isso foi feito através da apresentação de um pouco da história do cientistas que desenvolveram esse estudo e utilizando uma simulação computacional, para que os alunos compreendam o aparato experimental em si. Na parte final, foi realizada uma atividade, na qual os alunos deveriam usar a explicação de Einstein para responder os dados experimentais. Além disso, com essa explicação de Einstein foi possível discutir a natureza da radiação, introduzindo a discussão sobre a dualidade onda-partícula.

Na penúltima atividade, discutimos o problema da dualidade onda-partícula, a partir da discussão de um experimento mental, envolvendo duas fendas. Posteriormente às discussões, foi apresentado Maurice de Broglie e sua teoria, que descrevia o comportamento ondulatório para a matéria.

E por fim, na última atividade, fizemos as discussões sobre o desenvolvimento dos modelos atômicos. A ideia foi construir e desenvolver cada modelo de forma que os alunos entendessem que foram estudos e pesquisas sequenciais, de forma que cada um foi completando as lacunas surgidas com novas experiências e dados.

Esse trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 apresentamos e discutimos os tópicos de FMC, selecionados para compor o minicurso. Neste capítulo há algumas considerações sobre o contexto histórico e como ocorreu o desenvolvimento de tal tema, além disso, há também alguns tópicos que foram construídos de maneira mais analítica, devido a ausência de materiais sobre eles.

No capítulo 3, abordamos a metodologia utilizada no trabalho, tanto a de pesquisa quanto a de ensino. Nele há uma base para o procedimento adotado, que foi a coleta de dados, para, posteriormente, refletir sobre eles e investigá-los. Além disso, segue também algumas maneiras alternativas de se desenvolver as temáticas do minicurso.

No capítulo 4 apresentamos um relato sobre o desenvolvimento das atividades, seguidas de uma reflexão sobre os resultados obtidos com cada uma delas. O relato foi narrado após o encontro, em um arquivo separado, de maneira a enfatizar as principais discussões e ações dos estudantes ao longo das aulas. Além disso, há também a análise das respostas dadas pelos estudantes nos questionários, que envolvem os tópicos discutidos nos respectivos encontros.

No capítulo 5 apresentamos as nossas considerações finais. Nele há discussões e reflexões acerca dos objetivos iniciais do trabalho. Além disso, há também a identificação de temas que geraram mais discussões e que fizeram os encontros renderem bons resultados, assim como temas que geravam silêncio dentro da sala. Com base nos relatos e resultados do minicurso, há uma discussão a partir deles, de forma a relacionar com os objetivos do trabalho.

2 TÓPICOS DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA – UMA BREVE DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentamos uma breve discussão teórica sobre os tópicos de Física Moderna e Contemporânea que deram origem ao nosso minicurso – Radiação de Corpo Negro, Efeito Fotoelétrico, Dualidade Onda-Partícula e Modelos Atômicos.

A intenção é descrever os aspectos físicos que foram relevantes na nossa preparação, tentando sempre desenvolver aqueles pontos da teoria que são fundamentais para a compreensão da importância dessas discussões para o surgimento da chamada Física Moderna. Além disso, de maneira a fomentar a formação devido a ausência e defasagem de alguns temas, por parte do autor, foi feito o estudo aprofundado de alguns, que, serve também como um material de estudo complementar aos professores ou, até mesmo, alunos ingressantes em cursos de física. Por este motivo, eles foram inseridos nesse trabalho, em específico, neste capítulo.

Começamos fazendo uma introdução ao tema e depois passamos para o desenvolvimento teórico, iniciando com uma breve revisão sobre o comportamento ondulatório das ondas eletromagnéticas.

2.1 Escalas de Tamanho do Universo

Antes de abordarmos especificamente os tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) que deram origem a Mecânica Quântica e que serão discutidos no nosso minicurso, é importante estabelecer uma compreensão sobre as diversas escalas de tamanho presentes no universo e entender como a dimensão destes diferentes corpos varia, influenciando a maneira como os descrevemos. A tabela (2.1), mostra exemplos desta escala.

Tabela 2.1 – Variação de escalas de tamanhos para diversos corpos dentro do nosso universo, do muito pequeno ao muito grande.

Objetos	Escala (metros)
Raio do átomo de Hidrogênio	3.1×10^{-11}
Raio de DNA	3.0×10^{-9}
Raio de uma gota de Névoa	2.0×10^{-5}
Comprimento de Beija-Flor	1.0×10^{-1}
Altura de um ser humano	1.7×10^0
Altura da Torre Eiffel	3.2×10^2
Extensão da Itália	1.1×10^6
Diâmetro de Júpiter	1.4×10^8
Distância de Netuno ao Sol ¹	4.5×10^{12}
Raio da Nebulosa de Órion	2.4×10^{17}
Raio da Via Láctea	1.2×10^{21}

Fonte: Autor (2019)

Analisando os dados apresentados na tabela (2.1) é possível perceber, por exemplo, que entre o Sol e Netuno cabem 1.5×10^{21} DNA! De um ponto de vista mais filosófico, temos que há um mundo dentro de outro mundo. As ordens de grandeza apresentadas na tabela (2.1) variam de 10^{-11} a 10^{21} , ou seja, variam em uma escala que engloba 31 ordens de grandeza!

A partir dessa compreensão é possível separarmos dois universos distintos, dentro dos quais podemos analisar o comportamento da matéria: o chamado mundo macroscópico e o mundo microscópico. E a Física utilizada para fazer essa descrição tem características distintas.

Conseguimos descrever os fenômenos vistos a olho nu, sem muitas dificuldades, com a nossa famosa Mecânica Clássica. Isso pode ser feito, tanto por pessoas que possuem um conhecimento mais aprofundado, como por aquelas que não são especialistas na área. Cientificamente ou informalmente, conseguimos dar uma breve explicação para qualquer fenômeno que vemos. O mundo que denominamos de macroscópico é totalmente descrito pela física clássica, porém a termo-

¹ Netuno é o planeta mais distante do Sol

dinâmica e o eletromagnetismo, descrevem fenômenos de partículas e do mundo microscópico com ela também.

No entanto, essa física não se aplica em alguns fenômenos, inclusive muitos dos quais não podemos visualizar. Dentro deles, muitos tiveram suas discussões e desenvolvimento no começo do século XX, quando começaram os estudos da estrutura atômica e de alguns fenômenos, para os quais a física clássica não conseguia responder, tais como: radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico, o raio-x, radioatividade, entre outros. Mesmo sendo em uma época onde não haviam aparatos experimentais precisos ou qualquer outro meio tecnológico que pudesse visualizar tais fenômenos e analisar com precisão esses dados, os conceitos desenvolvidos teoricamente foram bem precisos.

O que se obteve, foram resultados inaceitáveis, para os quais os conceitos físicos disponíveis (física clássica), não explicavam satisfatoriamente os fenômenos observados. E, um deles, é o que muitos denominam como sendo o nascimento da Física Quântica: a hipótese de Planck e a radiação do corpo negro.

A seguir, apresentaremos uma breve fundamentação teórica sobre os temas que fazem parte do minicurso proposto por nós, começando com uma contextualização sócio-histórica do final do século XIX, período em que as primeiras ideias acerca da interação entre radiação e matéria estavam surgindo, passando pela discussão da Radiação de Corpo Negro, Efeito Fotoelétrico, Modelos Atômicos, entre outros pontos. Essa fundamentação foi utilizada para a preparação das atividades do minicurso.

2.2 Contextualização Sócio-Histórica

Iniciamos o desenvolvimento do minicurso com uma discussão a partir de um vídeo que mostrava a aceleração de um carro, durante a qual era possível identificarmos várias das grandezas físicas envolvidas e também compreender como elas se modificavam conforme o movimento do carro se alterava. Enfatizamos que toda

essa maneira de compreendermos esse e outros movimentos cotidianos é possível graças à Mecânica Clássica, de Newton e de Galileu.

O desenvolvimento de um carro, como o que foi apresentado no início da atividade 1, com uma potência de mais de 1000 cavalos, se deve, em grande parte, ao desenvolvimento da Termodinâmica de Kelvin e Boltzmann.

No entanto, mesmo com esse conhecimento, oriundo da Mecânica Clássica e da Termodinâmica, sem a parte elétrica e eletrônica, esse mesmo carro não teria a utilidade que tem. Ou mesmo, seria um carro impossível de dirigir. E esse desenvolvimento, da parte elétrica e eletrônica, está associado diretamente ao eletromagnetismo de Faraday e Maxwell, além, é claro, da dependência com a Mecânica Quântica, que possibilitou o desenvolvimento dos transistores.

No entanto, mesmo diante de tanta tecnologia, ainda usamos coisas que se baseiam na física do século passado e até mesmo na do século retrasado. Como foi possível a física dar tantos saltos, em um período de tempo tão curto? Há um motivo para esse *boom* científico?

Há de se considerar um fato muito importante ao analisarmos o período em que esse *boom* ocorreu, meados do século XIX, que diz respeito ao contexto histórico que a humanidade vivia, e que vinha acontecendo no mundo, em especial na Europa. Esta época foi repleta de reviravoltas sociais e muitas insatisfações políticas. Todos esses movimentos foram fortemente influenciados pelas teorias sociais desenvolvidas à época, que iam do socialismo ao nacionalismo, visto que estamos falando de uma época em que a Revolução Industrial¹ estava em ascensão e se consolidava, gerando um mundo industrializado. Conforme Silva (2006, p.6):

... a Revolução Industrial assumiu novas características e uma incontida dinâmica, impulsionada por inovações técnicas, como a descoberta da eletricidade, a transformação de ferro em aço, o surgimento e o avanço dos meios de transporte e, mais tarde, dos meios de co-

¹ Esse período correspondeu a chamada Segunda Revolução Industrial

municação, o desenvolvimento da indústria química e de outros setores. Portanto, havia uma forte correlação entre indústria e ciência, na qual diferentemente da primeira Revolução Industrial, aquela fazia um uso sistemático desta. Essa associação fez com que os custos de produção ficassem elevados, obrigando a junção de conhecimentos para enfrentar tal problema.

Nesse novo mundo, se acentuou a divisão de classes. Isso fez com que muitas pessoas trabalhassem em situações precárias, gerando um ambiente propício à revoltas e mudanças de paradigmas. Dentro desse contexto, em que se buscava erradicar as injustiças sociais, foi criado o Socialismo, sob forte influência do filósofo e cientista social Karl Marx. As ideias desenvolvidas por ele viriam a dividir o mundo e influenciar de maneira significativa o desenvolvimento sociopolítico até os dias de hoje.

Além disso, algumas ciências se desenvolveram às margens do contexto industrial e social, tal como a teoria evolucionista de Charles Darwin. Segundo essa teoria, a evolução das espécies se dá por mutações genéticas em alguns organismos, tornando-os mais adaptados ao ambiente em que vivem. Percebe-se que a ciência da época enfatizava a experimentação, a observação da natureza e dos fenômenos naturais, com o intuito de extrair dela as informações necessárias para se desenvolver leis universais (BARRETO, 2016). Assim, começou-se a criar e desenvolver o cientificismo, o qual entrou em conflito com a Igreja Católica e com a própria Filosofia, visto que esta baseava-se em ideias abstratas.

Auguste Comte auxiliou no aprofundamento do cientificismo no século XIX, com o desenvolvimento do positivismo (CHASSOT, 2004). Ele defendia que os fenômenos naturais não se reduziam a um único princípio e que a humanidade rumava, em uma espécie de *marcha natural*, para o desenvolvimento de uma sociedade amparada fundamentalmente no saber científico.

Paralelamente a todos esses fatos, na literatura, o Realismo propunha a eliminação da tendência subjetiva do autor em favor de um relato mais real da natureza. Todo esse contexto cientificista favoreceu a produção de uma arte pautada pela objetividade, conforme citado por Gustave Flaubert, um dos principais escritores do Realismo. Para ele, a função do artista e do escritor era somente representar o que é visível a todos.

No mesmo período e seguindo o mesmo contexto sociocultural, surgia na França o movimento literário Naturalismo, que teve como mentor o francês Émile Zola (1840-1902) (BARRETO, 2016). Em contrapartida a idealização do indivíduo burguês ², foi utilizada a representação objetiva do ser humano em suas condições mais adversas e baixas (BARRETO, 2016). Assim, os autores naturalistas observavam essa realidade através das lentes da ciência, o que, consequentemente, resultou em obras com influências científicas, principalmente do determinismo ³.

Dentro desse movimento, a Física sofre grandes transformações, com o estabelecimento do eletromagnetismo, que unificou os estudos da eletricidade, do magnetismo e da ótica. Mas não só isso, a termodinâmica desempenhou um papel de extrema importância para que a Revolução Industrial fosse possível, através da compreensão das máquinas à vapor. E, quando tudo parecia pronto, surgem alguns problemas que foram, inicialmente, encarados como pequenas perturbações que deveriam ser compreendidas com alguns aprimoramentos tecnológicos. No entanto, esses pequenos problemas deram origem ao que veio a se denominar de Física Moderna, que engloba a Relatividade e à Mecânica Quântica, objeto do nosso minicurso.

Na sequência faremos uma breve apresentação dos tópicos de física necessário para o desenvolvimento das atividades e construção delas.

² Considerado o pilar da arte romântica.

³ O determinismo defende a sujeição incondicional do ser humano a três fatores: meio, raça e momento histórico. Isso vai de encontro a autonomia do indivíduo sobre a própria vida.

2.3 Ondas Eletromagnéticas

Esta seção foi baseada nas referências (ALONSO; FINN, 1972), (WALKER, 2009) e (NUSSENZVEIG, 2004). Porém, a seção no qual faz uma discussão mais quantitativa e detalhada do comportamento ondulatório, foi baseado exclusivamente na referência (ALONSO; FINN, 1972).

2.3.1 Ondas

Um dos conceitos mais importantes dentro da física, se refere aos movimentos ondulatórios. Cotidianamente, ao se falar de ondas, as pessoas imaginam ou citam as ondas do mar ou aquelas produzidas na superfície da água (NUSSENZVEIG, 2004). Apesar disso, a explicação analítica e detalhada sobre o comportamento ondulatório é bem complicada, e não faz parte do conhecimento informal sobre as ondas, o que nos mostra uma defasagem entre o uso cotidiano desses conceitos e o conhecimento científico sobre eles.

Uma maneira simples e que abrange bem a definição conceitual de onda mecânica é aquela que afirma que *uma onda é uma informação que vai de um ponto ao outro, através de um meio material, com uma velocidade v bem definida*. Existe um ponto importante nessa definição: uma onda transporta informação, não há transporte de matéria.

Podemos associar essa definição com o exemplo de uma folha seca sobre a superfície de um lago. Ao perturbar a água do lago com o lançamento de uma pedra ou algum outro objeto, vemos que quando essa perturbação passa pela folha, ela não a carrega. O que vemos é a folha "subir" e "descer" e ir para frente ou voltar, como se estivesse oscilando em sua posição de equilíbrio. Esse movimento aparente da folha nos dá uma informação importante sobre a onda, que é sua forma, e essa forma se propaga ao longo da superfície da água. Portanto, essa perturbação gerada não transporta uma parte da massa da água e sim a energia referente ao choque do objeto com a superfície do lago. Formalmente, o comprimento do

movimento de subir e descer ou ir para a frente e voltar para trás, é denominado de comprimento de onda.

Vamos imaginar duas situações (dois extremos). Uma pedra bem pequena (dessas usadas nas construções de casa) e um tijolo. Ao compararmos o movimento da folha, para cada perturbação gerada por cada um desses objetos, vemos que esse movimento é diferente: para um ela sobe mais e para outro sobe menos. Evidentemente, o tijolo gera uma perturbação maior, logo ele faz com que o movimento da folha vá mais alto e mais para frente do que o movimento gerado pela pedra menor. A informação que chega até a folha é a energia que cada objeto transfere para a água ao perturbar a superfície do lago.

Mas há casos em que o movimento de um objeto, quando uma oscilação passa por ele, se dá apenas para cima e para baixo ou para frente e para atrás. Como dito anteriormente, isso nos dá a forma da onda e está associado com a *direção de propagação da onda*. Além disso, é importante destacar que o meio onde a onda mecânica se propaga é composto por partículas. Ondas que geram um movimento de cima para baixo dessas partículas são denominadas **Ondas Transversais** e ondas que geram um movimento de ir para a frente e para trás, são denominadas **Ondas Longitudinais**. Definindo formalmente, para as ondas transversais temos que a vibração das partículas é perpendicular à propagação da onda e para as longitudinais a vibração é paralela à propagação da onda. As ondas sonoras são um exemplo de onda longitudinal, na qual a fonte comprime uma porção de ar adjacente e essa compressão é transmitida de camada a camada. A oscilação de uma corda é um exemplo de onda transversal, na qual ao impulsionarmos a corda para cima e para baixo, o movimento da crista e do vale forma um ângulo de 90° com a direção de propagação da corda.

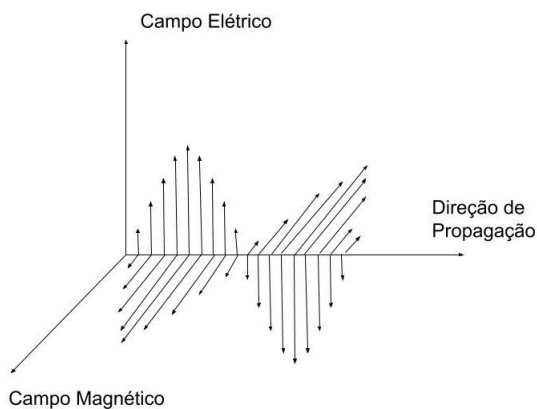
Mas, até o momento só nos referimos à ondas se propagando em meios materiais. No entanto, a informação que se propaga de um ponto ao outro, só depende do meio material se dele necessitar. Existem informações que não precisam

de um meio material para se propagar, como por exemplo, a luz do sol que chega até nós ou sinais de rádio enviados aos satélites no espaço. A partir disso, podemos classificar as ondas de acordo com a necessidade ou não de um meio material de propagação. Essa classificação é a seguinte:

- **Ondas Mecânicas** são aquelas que necessitam de um meio material para se propagar;
- **Ondas Eletromagnéticas** são aquelas que não necessitam de um meio material para se propagar.

As ondas eletromagnéticas são ondas transversais e apresentam uma aparência bem diferente das ondas mecânicas, pois possuem um campo elétrico \vec{E} e um campo magnético \vec{B} associados a ela. Os dois campos oscilam de forma que se mantêm perpendicular à direção de propagação, conforme mostra a figura (2.1).

Figura 2.1 – Representação de uma onda eletromagnética, destacando-se os campos elétrico e magnético, bem como a direção de propagação.



Fonte: Autor (2019)

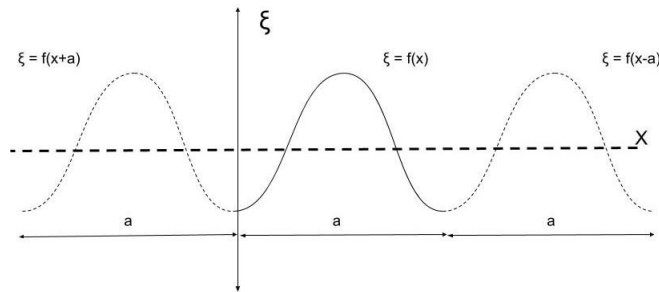
Nos interessa discutir os conceitos referentes à ondas eletromagnéticas. Para maiores detalhes sobre as ondas mecânicas, o leitor pode consultar as referências Nussenzveig (2004, cap. 5), Alonso e Finn (1972, cap. 18) e Walker (2009, cap. 15).

Porém, para dar início a essa discussão é necessário começar com um estudo mais detalhado sobre as características analíticas desse tipo de propagação. As próximas seções abordarão as ondas eletromagnéticas e estão fundamentadas nas referência Alonso e Finn (1972, cap. 19).

2.3.2 Análise de uma propagação

A figura (2.2) apresenta a representação para a propagação de um pulso unidimensional

Figura 2.2 – Representação da propagação unidimensional de uma onda ξ na direção do eixo horizontal x .



Fonte: Autor (2019)

Da figura (2.2) temos que $\xi = f(x)$ (linha cheia) representa a onda ou pulso inicial, e as curvas tracejadas representam $f(x+a)$ e $f(x-a)$, com a sendo um número real. Isso representa o deslocamento da função inicial, para a esquerda ou para a direita, de a unidades de comprimento (ALONSO; FINN, 1972).

Considerando essa curva uma onda, ou seja, uma propagação de energia, podemos atribuir a ela uma velocidade de propagação v . Então, se definirmos o deslocamento a como:

$$a = vt \quad (2.1)$$

teremos

$$\xi = f(x - vt) \quad (2.2)$$

$$\xi = f(x + vt) \quad (2.3)$$

Portanto, podemos considerar que a função dada pela eq.(2.4)

$$\xi(x, t) = f(x \pm vt) \quad (2.4)$$

é a descrição de uma propagação, na qual não há deformação, ao longo do eixo positivo ou negativo dos x e a característica oscilatória de seu movimento se repete, pontos de máximo (**crista**) e pontos de mínimo (**vale**) que se sucedem periodicamente.

Assim, temos a definição de um *movimento ondulatório*. A eq.(2.4) pode representar diversos fenômenos físicos, tais como: deformação de um material, pressão em um gás, campo elétrico ou magnético, entre outros (ALONSO; FINN, 1972).

Um movimento ondulatório possui duas grandezas fundamentais associadas a ele, que o caracterizam, que são:

- Comprimento de Onda (λ), que é a distância entre dois pontos de uma onda, no qual eles se repetem;
- Frequência (f) que é o número de oscilações de uma onda dentro de um intervalo de tempo de um segundo.

A frequência f também é definida como o inverso do período,

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.5)$$

O período, que é representado por T , nos diz o tempo que a propagação leva para completar um comprimento de onda ou um ciclo.

Como já mencionado, todo movimento ondulatório possui uma velocidade v , que pode ser obtida da seguinte forma:

$$\begin{aligned} v &= \frac{\Delta S}{\Delta t} \\ v &= \frac{\lambda}{T} \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.3.3 Intensidade de uma onda

Substituindo a eq.(2.5) na eq.(2.6), temos que:

$$v = \lambda f \quad (2.7)$$

Considerando que estamos analisando uma oscilação sem interferências e é contínua, temos essa oscilação pode ser descrita por uma função harmônica ou senoidal⁴, definida por:

$$\xi(x, t) = \xi_0 \sin(k(x - vt)) \quad (2.8)$$

A quantidade k representa o número de comprimentos de onda ao longo de uma distância 2π e é denominado como número de onda:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.9)$$

Portanto, a equação (2.8) pode ser reescrita, ficando como mostra a eq.(2.10)

$$\xi(x, t) = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right) \quad (2.10)$$

⁴ Para maiores detalhes, consultar (ALONSO; FINN, 1972).

A eq.(2.10) representa uma onda senoidal ou harmônica, com um comprimento de onda λ , propagando-se para a direita ao longo do eixo x com velocidade v . Outra forma também de se representar a eq.(2.8) é

$$\xi(x,t) = \xi_0 \sin(kx - \omega t) \quad (2.11)$$

com⁵

$$\omega = kv = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad (2.12)$$

2.3.4 Equação Diferencial para o Movimento Ondulatório

Nessa seção, iremos analisar e investigar o movimento de um campo vetorial, dependente do tempo, propagando-se como uma onda, sem interferência ou distorção.

Sabemos que um campo, seja ele magnético, elétrico ou gravitacional, é associado à um respectivo fenômeno físico e é governado por leis dinâmicas, as quais podem ser expressas por equações diferenciais. Assim, podemos encontrar uma equação diferencial que seja aplicável a todos os tipos de movimento ondulatório e que represente um determinado campo. Se ele satisfizer tal equação, ele se propagará ao longo do espaço com uma velocidade definida e sem distorção (ALONSO; FINN, 1972).

A equação diferencial que descreve o movimento ondulatório unidimensional é dada por⁶:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.13)$$

⁵ Para maiores discussões ver (ALONSO; FINN, 1972).

⁶ Para maiores detalhes, consulte a referência (ALONSO; FINN, 1972)

Quando temos o caso da propagação de duas ondas, uma no sentido $+x$ e outra no sentido $-x$, por reflexão por exemplo, teremos a forma geral, dada pela eq.(2.14):

$$\xi(x, t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad (2.14)$$

A eq. (2.14) é a solução geral para a eq. (2.13). Para mostrar isso, vamos usar a técnica de derivação em cadeia⁷. Inicialmente, temos uma função $y = f(u)$, na qual u é uma função de x . A derivação em cadeia nos dá como resultado a eq. (2.15)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{du} \frac{du}{dx} \quad (2.15)$$

Da eq. (2.14), temos que $u = x \pm vt$. Calculando as derivadas parciais, temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= 1 \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= \pm v \end{aligned} \quad (2.16)$$

Assim, usando as eq.(2.16) na eq.(2.13), temos:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} f(u) = \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial u} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} f(u) = \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} = \pm v \frac{\partial f}{\partial u}$$

Vamos agora calcular as derivadas parciais de segunda ordem:

⁷ Para maiores detalhes consulte o capítulo 3 da referência (SHENK, 1988).

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial u} = \frac{\partial}{\partial u} \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \xi}{\partial t} = \pm v \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial u} = \pm v \frac{\partial}{\partial u} \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial u^2}$$

Portanto, usando as eqs. (2.18) na eq. (2.13) temos que:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.19)$$

O resultado apresentado na eq.(2.19) comprova que a eq. (2.14) é uma solução da equação de onda (2.13) e que essa solução é independente da forma da função f . Vale lembrar que estamos analisando uma onda linear, então a solução geral é do tipo dado pela eq. (2.14).

Podemos usar o exemplo da onda senoidal (2.11) para verificar o resultado apresentado na eq.(2.19).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial x} &= k \xi_o \cos k(x - vt) \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} &= -kv \xi_o \cos k(x - vt) \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = -k^2 \xi_o \sin k(x - vt), \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -k^2 v^2 \xi_o \sin k(x - vt) \quad (2.22)$$

Portanto, temos que a onda senoidal é uma solução para a equação de onda pois satisfaz a eq.(2.19).

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.23)$$

2.3.5 Ondas Eletromagnéticas

No fim do século XIX, *Heinrich Hertz* (1857-1894) físico alemão, encontrou evidências que o campo eletromagnético oscila no vácuo com velocidade igual à velocidade da luz c . Todas as informações obtidas por ele permitiram o desenvolvimento da telecomunicação, bem como de toda a sociedade moderna. Porém, antes mesmo de Hertz, Maxwell já havia previsto a existência de ondas eletromagnéticas, através de uma análise cuidadosa das equações do campo eletromagnético (ALONSO; FINN, 1972). Então, antes de prosseguirmos iremos estudar essas equações e visualizar como a propagação desse campo ocorre sob a forma de ondas. Lembrando que, os campos elétrico e magnético, devem satisfazer a eq.(2.23).

2.3.5.1 Equações de Maxwell

Uma das forças fundamentais da natureza é a força eletromagnética. Isso significa que há uma *interação eletromagnética* entre algumas das partículas fundamentais. Essa interação está associada à presença de uma propriedade particular de cada partícula, que é a carga elétrica. Vamos iniciar pelo estudo do campo eletromagnético, caracterizado pelos vetores campo elétrico \vec{E} e campo magnético \vec{B} .

A força que atua sobre cada carga elétrica é dada por:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.24)$$

Os campos elétrico e magnético são grandezas vetoriais e dependentes da posição e do movimento respectivo de cada carga. Eles estão relacionados pelas equações de Gauss, de Ámpere-Maxwell e de Faraday-Henry e são dependentes do movimento relativo do observador e das cargas que produzem o campo (ALONSO;

FINN, 1972). Tudo isso é descrito por quatro leis que compõem as chamadas equações de Maxwell.

James Clerk Maxwell ficou conhecido por ter unificado a eletricidade e o magnetismo de forma a desenvolver uma teoria única do eletromagnetismo. As relações descritas anteriormente, agora estão escritas em suas formas integral e diferencial e que, juntamente com a equação (2.24), constituem a estrutura básica da teoria das interações eletromagnéticas (ALONSO; FINN, 1972).

Como já mencionado, Hertz produziu experimentos e estudou as propriedades das ondas eletromagnéticas, encontrando evidências das relações construídas por Maxwell. Com isso, a teoria de Maxwell ganhou força, visto que inicialmente estava fora dos padrões da Europa e não era considerada a mais apropriada (MARTINS, 2005). Após as descobertas de Hertz, as comunicações começaram a se desenvolver, com o aparecimento do telégrafo sem fio, por exemplo, que teve sua origem graças a utilização prática dessas ondas. No final do século XIX a teoria de Maxwell e as ondas eletromagnéticas já não eram mais menosprezadas e ignoradas, de forma que elas representavam a interação eletromagnética.

De forma resumida, as equação de Maxwell para o Campo Eletromagnético são:

Tabela 2.2 – Equações de Maxwell para o Campo Eletromagnético.

Lei	Forma Integral	Forma Diferencial
I. Lei de Gauss para o Campo Elétrico	$\oint_S \vec{E} \cdot u_n dS = \frac{q}{\epsilon_0}$	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
II. Lei de Gauss para o Campo Magnético	$\oint \vec{B} \cdot u_n dS = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
III. Lei Faraday - Henry	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint_S \vec{B} \cdot u_n dS$	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
IV. Lei Ampère-Maxwell	$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot u_n dS$	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Fonte: (ALONSO; FINN, 1972, p.176).

Apesar de sua consistência e de serem representadas numa forma mais matemática e quantitativa, as equações de Maxwell possuem algumas limitações, como a interação entre partículas de altas energias. Porém, casos em que há interações eletromagnéticas entre grandes quantidades de cargas, tais como: antenas, circuitos elétricos, feixe de átomos ou moléculas ionizadas, se adaptam muito bem a essa descrição.

2.3.5.2 Ondas Eletromagnéticas Planas

Como visto, as ondas eletromagnéticas possuem um campo elétrico e um campo magnético, perpendiculares entre si. Iremos agora investigar analiticamente se as equações de Maxwell admitem essas características.

Primeiramente, iremos analisar o caso para uma onda plana se propagando no vácuo, para visualizarmos de maneira mais clara os campos e sua relação com as equações de Maxwell. Este exemplo é mais simples pois não é preciso considerar os três eixos de um espaço euclidiano.

Uma onda plana é, por definição, aquela que possui sua frente de onda formada por planos infinitos, paralelos entre si, e que possuem amplitude e vale constantes ao longo de sua propagação, conforme mostra a figura (2.3):

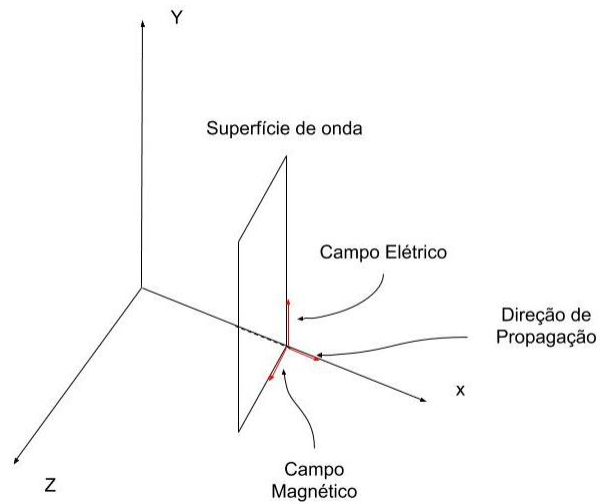
Com isso, temos:

$$E_x = E_z = 0 \text{ e } E_y = E \quad (2.25)$$

$$B_x = B_y = 0 \text{ e } B_z = B$$

Como essa onda se propaga no vácuo, não há cargas livres e nem correntes. Isto significa que:

Figura 2.3 – Representação de uma Onda Eletromagnética Plana.



Fonte: Autor (2019).

$$\rho = 0 \quad (2.26)$$

$$\hat{j} = 0$$

Usando esses valores, aplicados nas equações apresentadas na tabela (2.2), encontramos:

1. Lei de Gauss para o Campo Elétrico

$$\begin{aligned} \nabla \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \rightarrow \nabla \vec{E} = 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \right) \cdot (E_x \hat{i} + E_y \hat{j} + E_z \hat{k}) &= 0 \\ \frac{\partial E_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (2.27)$$

2. Lei de Gauss para o Campo Magnético

$$\begin{aligned} \nabla \vec{B} &= 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \right) \cdot (B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k}) &= 0 \\ \frac{\partial B_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.28)$$

3. Lei de Faraday-Henry

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \right) \times (E_x \hat{i} + E_y \hat{j} + E_z \hat{k}) &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \frac{\partial E}{\partial x} \hat{k} - \frac{\partial E}{\partial z} \hat{i} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Sabendo que,

$$\frac{\partial E}{\partial z} \hat{i} = 0 \quad (2.30)$$

Então,

$$\frac{\partial E}{\partial x} \hat{k} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.31)$$

4. Lei Ampère - Maxwell

$$\begin{aligned}
\nabla \times \vec{B} &= \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\
\left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \right) \times (B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k}) &= \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\
\frac{\partial B}{\partial y} \hat{i} - \frac{\partial B}{\partial x} \hat{j} &= \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t}
\end{aligned} \tag{2.32}$$

Sabendo que,

$$\frac{\partial B}{\partial y} \hat{i} = 0 \tag{2.33}$$

Então,

$$-\frac{\partial B}{\partial x} \hat{j} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t} \tag{2.34}$$

Portanto, vemos pelas equações encontradas que o campo elétrico \vec{E} e o campo magnético \vec{B} , dependem apenas de x e t , ficando independentes de y e z . Assim, iremos investigar a dependência de \vec{E} e \vec{B} em relação a x e t . Derivando a equação (2.31) em relação a x teremos:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 B}{\partial x \partial t} \tag{2.35}$$

De maneira análoga, derivamos a equação (2.34) em relação a t :

$$-\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x \partial t} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \tag{2.36}$$

Combinando as equações (2.35) e (2.36), temos:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} &= \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}\end{aligned}\quad (2.37)$$

Observe que a equação (2.37) é semelhante à (2.23). Essa comparação, nos diz que o campo elétrico \vec{E} se propaga ao longo do eixo x com uma velocidade

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.38)$$

A velocidade encontrada na eq.(2.38) é nada mais nada menos, do que a velocidade da luz no vácuo:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.39)$$

Através das equações de Maxwell, é possível notar que o campo eletromagnético obedece a equação diferencial de um movimento ondulatório e que o campo elétrico se propaga, no vácuo, com velocidade da luz dada pela equação (2.39).

Lembrando que a função que representa uma onda é dada pela equação (2.4), então podemos representar o campo elétrico E por:

$$E = E(x - ct) \quad (2.40)$$

Realizando o mesmo procedimento para o campo magnético⁸, teremos:

⁸ Fica a cargo do leitor realizar os cálculos.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x \partial t} = -\frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

(2.41)

$$-\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \epsilon_o \mu_o \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial t}$$

Logo,

$$-\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \epsilon_o \mu_o \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

(2.42)

$$\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_o \mu_o} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2}$$

Conforme a eq.(2.39), o campo magnético também se propaga no vácuo com a velocidade da luz e também satisfaz a equação diferencial do movimento ondulatório.

Para o caso de uma onda se propagando no vácuo, sem interferências, podemos defini-la como uma onda harmônica, formada por um campo magnético e um campo elétrico com a mesma estrutura apresentada na equação (2.10):

$$E = E_o \sin k(x - ct) \quad (2.43)$$

$$B = B_o \sin k(x - ct)$$

Conforme as equações (2.35) e (2.36), percebemos que as amplitudes E_o e B_o não são independentes.

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial t} &= -kcE_o \cos k(x-ct) \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial E}{\partial t} = k^2 c E_o \sin k(x-ct) \quad (2.44) \\ \frac{\partial B}{\partial t} &= -kcB_o \cos k(x-ct) \rightarrow \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial B}{\partial t} = -k^2 c^2 B_o \sin k(x-ct)\end{aligned}$$

Portanto, usando as eqs. (2.44) nas eqs. (2.41) temos que:

$$\begin{aligned}k^2 c E_o \sin k(x-ct) &= k^2 c^2 B_o \sin k(x-ct) \\ E_o = c B_o \quad \text{ou} \quad B_o &= \frac{1}{c} E_o \quad (2.45)\end{aligned}$$

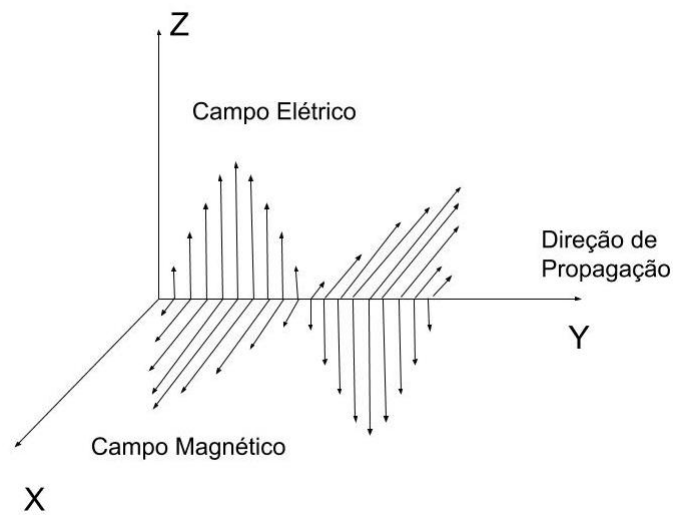
Se as amplitudes dos campos elétrico e magnético estão relacionadas entre si pela eq.(2.45), podemos dizer que os campos são diretamente proporcionais e que seus valores máximos e mínimos (vales e cristas) são coincidentes. Portanto, a representação de uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo (onda harmônica), é semelhante à figura (2.4), onde temos o campo elétrico oscilando no plano xz e o campo magnético se propagando no plano xy .

Portanto, podemos concluir que as soluções encontradas para as equações de Maxwell valem para casos gerais e que as ondas eletromagnéticas são ondas transversais, possuindo um campo elétrico e magnético perpendiculares entre si, e ambos perpendiculares à direção de propagação das ondas.

Além disso, as soluções para ondas eletromagnéticas esféricas ou cilíndricas são encontradas para as equações de Maxwell (ALONSO; FINN, 1972). Considerando longas distâncias, uma parte delas pode ser considerada plana, para a qual teremos à mesmas configurações citadas anteriormente, porém os campos elétrico e magnético serão perpendiculares à uma direção de propagação que está na direção radial⁹.

⁹ Para maiores detalhes sobre ondas esféricas ou cilíndricas, consulte (ALONSO; FINN, 1972).

Figura 2.4 – Representação para uma Onda Eletromagnética Harmônica.



Fonte: Autor (2019).

2.3.5.3 Energia

A energia referente ao campo elétrico gerado por uma onda eletromagnética é dada por¹⁰:

$$E_{\varepsilon} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon^2 \quad (2.46)$$

Na eq.(2.46), ε representa o campo elétrico.

Semelhantemente, a energia magnética é:

$$E_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2 = \frac{1}{2\mu_0 c^2} \varepsilon^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon^2 \quad (2.47)$$

Portanto, a energia total associada a uma onda eletromagnética será dada por:

¹⁰ Veja detalhes na referência (ALONSO; FINN, 1972), seção 16.9

$$\begin{aligned}
 E = E_\epsilon + E_B &= \frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon^2 + \frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon^2 \\
 E &= \epsilon_0\epsilon^2
 \end{aligned}
 \tag{2.48}$$

Sabendo que a intensidade de uma onda¹¹ é dada pela energia que flui por uma área unitária em uma unidade de tempo, teremos:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{1}{A} \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{A} vAE \\
 I &= vE = cE
 \end{aligned}
 \tag{2.49}$$

Usando os resultados dados pelas eqs. (2.46) e (2.47) na eq.(2.49)¹², temos:

$$I = c\epsilon_0\epsilon^2 \tag{2.50}$$

¹¹ Esse resultado, ou melhor dizer, essa definição, é aplicável tanto para ondas sonoras como para ondas eletromagnéticas

¹² Para maiores detalhes, consulte Alonso e Finn (1972, p. 263)

2.4 Radiação de Corpo Negro – Constante de Planck

2.4.1 Calor e Temperatura

Da mesma forma que ocorre com os problemas da mecânica, para avaliarmos e entendermos a grandeza temperatura temos que considerar o referencial ao qual estamos nos referindo. O que nos parece quente, pode parecer frio para outra pessoa. A partir dessa percepção nos vem a ideia de que um corpo mais quente que outro, possui uma maior temperatura. Mas, essa é apenas uma percepção sensorial. Por exemplo, quando comparamos uma xícara de café, que acabou de ser coado, com um copo de leite que estava na geladeira, consideramos que o café está quente. Porém, se colocarmos esta xícara de café próximo a um metal derretido, ela nos parecerá com uma temperatura inferior à ele. Um outro exemplo comum no nosso cotidiano aparece quando tocamos ao mesmo tempo um bloco de madeira e um bloco de metal, estando ambos à mesma temperatura, isto é, à temperatura ambiente. O que percebemos é que o bloco metálico nos parecerá mais frio que o bloco de madeira. Portanto, para avaliar a temperatura, de uma maneira geral, não podemos confiar na nossa percepção. Temos que recorrer a outros mecanismos para obter informações sobre a temperatura de um corpo. O termômetro é o instrumento que usamos para isso. O termômetro clínico, quando colocado embaixo do braço de um paciente, entrará em equilíbrio térmico com ele, nos dando uma informação indireta da temperatura deste paciente.

Portanto, podemos definir que calor é uma energia que é transmitida de um corpo para o outro quando há uma diferença de temperatura entre eles. E a temperatura pode ser associada com a agitação das partículas que constituem o corpo.

- As temperaturas indicam o sentido em que se processa a transferência de calor entre dois corpos, que é do de maior temperatura para o de menor

temperatura. Isto significa que a energia térmica se transfere de um corpo de temperatura mais alta para um de temperatura mais baixa;

- A quantidade de calor transmitido ou absorvido por um corpo está relacionada com a variação de temperatura sofrida por ele, além de sua massa e do tipo de material do qual ele é formado.

2.4.2 Radiação Térmica

O termo radiação está relacionado, de maneira muito frequente, apenas a Raios-X, radiação Solar, radiação nuclear e sempre trazendo um significado associado com os malefícios que pode causar ao ser humano, como por exemplo, nos causando câncer ou mutações genéticas (MEDEIROS, 2010). A relação que se faz do termo radiação com a radioatividade ou à radiação ionizante é evidente (MEDEIROS, 2010). A mesma leitura é feita por (HENRIKSEN, 2001) e (ALSOP, 2000) em trabalhos sobre concepções de estudantes acerca das radiações. Isso nos mostra que a utilização deste termo, de maneira geral, é inadequada, criando uma ideia falsa do que seja de fato uma radiação e distanciando as pessoas, de maneira geral, da compreensão das atuais tecnologias e do desenvolvimento científico.

Na física, uma propagação de energia, que vai de um ponto ao outro, independente do meio no qual isso ocorra, pode ser considerada uma radiação. Portanto, pela definição formal, temos que uma radiação é uma onda. O calor, como vimos, é uma energia em movimento e podemos considerá-la como uma onda. Assim, calor é uma radiação que chamamos de **Radiação Térmica**.

Para exemplificar, podemos imaginar a situação que ocorre em dias frios. A sensação de frio que sentimos é associada com a troca de energia do nosso corpo com o ambiente, ou seja, o nosso corpo está transferindo energia térmica para o meio circundante. De uma maneira mais usual, podemos dizer que nosso corpo está perdendo energia e o ambiente está ganhando. O contrário ocorre para dias quentes, em que nosso corpo adquire energia do meio. Portanto, quando dois

corpos são colocados em contato eles transferem energia entre si ou não, caso estejam em equilíbrio térmico. Essa energia que transita de um corpo para o outro é a radiação térmica ou calor.

Essa radiação possui uma forma, que é descrita por um espectro de radiação térmica, que é dependente do corpo que a está emitindo. Peduzzi (2008, p. 136) afirma:

A forma desse espectro, isto é, da curva em um gráfico de energia em função do comprimento de onda (ou da frequência) da radiação emitida, depende da natureza (substância) e da temperatura do corpo.

Por exemplo, o espectro de uma lâmpada incandescente e de um forno, ambos a mesma temperatura, não são iguais. Porém, existem alguns corpos que possuem espectros semelhantes, independentemente de sua composição, de que material é feito e de sua geometria, dependendo apenas da temperatura. Esses são os chamados corpos negros.

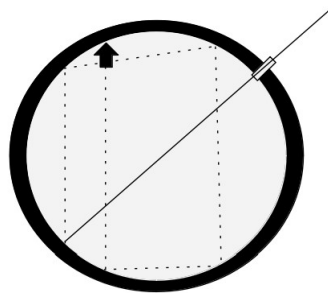
2.4.3 Radiação do Corpo Negro

No cotidiano, onde não existem situações ideais, as transferências de energias são realizadas a todo momento. Assim, todo corpo emite radiação térmica (EISBERG, 1979). Porém, existe um corpo que emite espectros de radiação térmica semelhantes ou melhor dizendo, nas palavras de Peduzzi (2008, p. 136) "um objeto teórico cujo comportamento reproduz, com grande aproximação, o espectro de emissão de muitos corpos".

Corpos negros em uma mesma temperatura, emitem radiação com o mesmo espectro e essa característica é independente de suas composições! A primeira menção à esse termo, foi dada por Kirchhoff, em 1860, que denominou esses corpos de corpo perfeitamente negro, ou negro, de forma mais abreviada (PEDUZZI, 2008).

Para representar um corpo negro ideal perfeito, a ideia é imaginar uma cavidade fechada e isolada termicamente do ambiente. Ela possui um pequeno orifício, no qual incide radiação térmica vinda do exterior (conforme figura 2.5 abaixo) e é refletida várias vezes, de forma a ser absorvida internamente, pelas próprias paredes. Sendo a área desse orifício muito pequena comparada com a área interna da superfície da cavidade, uma quantidade desprezível dessa radiação será refletida para fora da cavidade (EISBERG, 1979). Portanto, temos uma representação de um corpo negro, no qual toda radiação que incide sobre ele é absorvida e o que é emitido, tem características idênticas às de um corpo negro (PEDUZZI, 2008). Perceba que um corpo negro não reflete a radiação incidente.

Figura 2.5 – Esquema representando uma cavidade que simula um corpo negro.



Fonte: Autor(2019)

Em 1899, Otto Lummer e Ernst Pringsheim obtiveram as primeiras medidas da radiância de um corpo negro. Isso foi possível, devido ao aperfeiçoamento dos experimentos e do equipamentos da época. Novos prismas foram desenvolvidos, além de espectroscópicos de melhor resolução, juntamente com uma técnica para a coleta e análise de dados (PEDUZZI, 2008). Porém, o que eles conseguiram observar não condizia com a relação prevista por Wien (conhecida como *lei do deslocamento de Wien*), que relaciona a temperatura com o valor máximo do comprimento de onda da radiação emitida:

$$\begin{aligned}\lambda_{max}T &= const \\ v_{max} &\propto \frac{1}{T}\end{aligned}\tag{2.51}$$

e para o espectro da radiação de um corpo negro, que era dado por:

$$u(\lambda, t) = A\lambda^{-5} \exp^{-\frac{B}{\lambda T}}\tag{2.52}$$

onde A e B são constantes determinadas a partir dos dados experimentais.

A eq.(2.52), para Lummer e Pringsheim deveria possuir a forma (PEDUZZI, 2008):

$$u(\lambda, t) = AT\lambda^{-4} \exp^{-\frac{B}{(\lambda T)^n}}\tag{2.53}$$

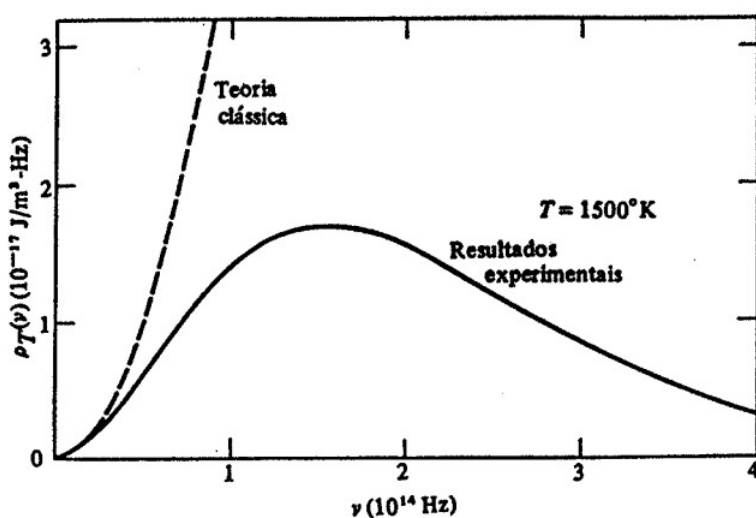
Rayleigh (John W. S. Rayleigh), também revisou a lei de Wien, discutindo que quando λ é maior que a constante B a energia não fica proporcional a temperatura, sendo contraditório ao que era observado experimentalmente. Ele desenvolveu uma função para a distribuição de energia da radiação de corpo negro, dada por:

$$u(\lambda, T) = A\lambda^{-4}T\tag{2.54}$$

Porém, como visto na figura (2.6), a equação (2.54) só apresenta resultados razoáveis para grandes comprimentos de ondas. Note-se que, a eq. (2.54) está dada em função do comprimento de onda e a figura (2.6), é referente à frequência. Lembrando que frequência e o comprimento de onda são grandezas inversamente proporcionais, portanto, a relação é: *apresenta resultados razoáveis para baixas frequências ou para grandes comprimentos de ondas*. Esse problema, ficou conhecido como *catastrófe do ultravioleta*. Nota-se que na figura 2.6, o eixo y,

que representa a intensidade está denominado como ρ , porém, estamos usando u para tal. Conforme apresentado por (PEDUZZI, 2008), Rayleigh adiciona à relação 2.54 um termo, sem fundamentação teórica para resolver essa problemática. Então, reformulando-a:

Figura 2.6 – Comparação entre a previsão teórica e os resultados experimentais para a emissão de um corpo negro e uma certa temperatura



Fonte: Eisberg (1979, p. 32).

$$u(\lambda, T) = A\lambda^{-4}T \exp^{-\frac{B}{\lambda T}} \quad (2.55)$$

Anos depois, James H. Jeans percebendo um erro na relação de Rayleigh, referente à constante presente na equação, publica em 1905, a seguinte relação:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2 kT}{c^3} \quad (2.56)$$

que ficou conhecida como lei de **Rayleigh-Jeans**. Apesar de toda essa reviravolta, das correções acerca do deslocamento de Wien e dos estudos realizados a partir da radiação do corpo negro, não houve a apresentação de uma relação que concordava com os dados experimentais. A física clássica do final do século XIX,

não conseguia desenvolver uma resposta razoável para explicar esse espectro da radiação térmica de um corpo negro ideal. Portanto, ficou claro que havia a necessidade do desenvolvimento de uma teoria que buscasse responder esse fenômeno. Isso é o que veremos na próxima seção.

2.4.3.1 Teoria de Planck

Conforme discutido na seção anterior, a lei de Wien não era razoável para a análise dos dados para baixas frequências. Planck discute isso em 1900, na reunião da Sociedade Alemã de Física, a qual foi publicada em *Verhandlungen der Deutschen Physicalischen Gesellschaft*. (PEDUZZI, 2008).

Partindo do gráfico da figura 2.6, percebemos que energia e temperatura são proporcionais. Aplicando uma constante de proporcionalidade, entre as grandezas, podemos desenvolver:

$$\varepsilon = kT \quad (2.57)$$

Planck, considerava que a parede interna da cavidade de um corpo negro (representação ideal de um corpo negro), era composta por n osciladores com uma energia média E .

Conforme Peduzzi (2008, p. 148)¹³ apresenta:

Em 1899, Planck já havia mostrado que a densidade espectral (energia por unidade de volume à frequência ν) de um corpo negro em equilíbrio à temperatura T e à energia média de um oscilador de frequência ν estavam relacionados pela expressão

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} E(\nu, T) \quad (2.58)$$

¹³ Para maiores detalhes sobre o desenvolvimento, consulte as referências (PEDUZZI, 2008) e (EISBERG, 1979)

Sendo a função energia, desenvolvida por Planck a partir da entropia média de um oscilador como:

$$E(\nu, T) = \frac{ak\nu}{\exp\frac{a\nu}{T} - 1} \quad (2.59)$$

Portanto, temos que a equação (2.58) será:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{ak\nu}{\exp\frac{a\nu}{T} - 1} \quad (2.60)$$

Voltando à ideia de que temos n osciladores na parede interna da cavidade, Planck relaciona energia e entropia, de forma que elas não sejam quantidades contínuas, mas grandezas discretas, compostas de um número inteiro de partes finitas iguais (PEDUZZI, 2008). A esta grandeza particular, a qual ele denomina como *quantum elementar de ação*, Planck denota que cada oscilador, pode ser uma fonte ou receptor da radiação incidente. E essa leitura é feita discretamente, relacionado à frequência de vibração do oscilador. Ele denotou como h o *quantum elementar de ação* e a energia referente a cada oscilador como:

$$\varepsilon = h\nu \quad (2.61)$$

Em dezembro de 1900, Planck apresenta à Sociedade Alemã de Física a sua proposta que consistia na seguinte relação.

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\frac{hc}{\lambda kT} - 1} \quad (2.62)$$

Conforme apresentado por (EISBERG, 1979), Planck não havia a certeza se o desenvolvimento do *quantum elementar de ação*, era apenas uma artifício matemático (para a correção do problema da catástrofe do ultravioleta) ou possuía um significado físico de fato.

Em 1931, escreveu uma carta ao físico inglês Robert Williams Wood, conforme apresentado por Eisberg (1979, p. 42) e lembrou que a proposição do *quantum elementar de ação* foi "um ato de desespero, porque, por natureza, sou pacífico e contra aventuras dúbias." E completou: "Porém, o problema tinha de ser resolvido a qualquer preço. Eu estava pronto para qualquer sacrifício das minhas convicções físicas". E tentou anos depois, encaixar essa teoria dentro da física clássica, porém, percebeu que elas não se relacionavam.

Conforme Peduzzi (2008 apud EISBERG, 1979):

A lei da radiação de Planck deixa claro que há limites na aplicabilidade das leis da física clássica. Ela “prova, pela primeira vez, que há escalas na natureza e que fenômenos em diferentes graus de grandeza não são necessariamente do mesmo tipo”

2.5 O Efeito Fotoelétrico

Como citado na introdução da seção (2.3), Hertz encontrou evidências que confirmaram a existência das ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell sobre a propagação da luz (EISBERG, 1979). Outro fato notado por ele, ao longo de suas experiências, foi que entre dois eletrodos, a descarga elétrica entre eles pode ocorrer mais facilmente com a incidência de uma radiação ultravioleta sobre eles.

Philipp Lenard¹⁴, que foi ganhador do nobel de 1905 pelas contribuições sobre o estudo e propriedades dos raios catódicos, percebeu que essa mesma radiação provoca essa descarga, de forma que os elétrons sejam "arrancados" da superfície de um catodo. Isso foi visualizado através dos aparatos experimentais de Wilhelm Hallwachs, que foi um construtor de instrumentos científicos. Além disso, ele foi assistente de Heinrich Hertz e formulou uma hipótese, na qual uma placa condutora sobre a qual incide radiação ultravioleta carrega-se positivamente, devido ao fato dos elétrons serem ejetados. Visualizou também, que isso acontecia com mais intensidade no selênio. Esse fenômeno, no qual há a emissão de elétrons de um material, provocado pela incidência de uma radiação, é denominado **efeito fotoelétrico**.

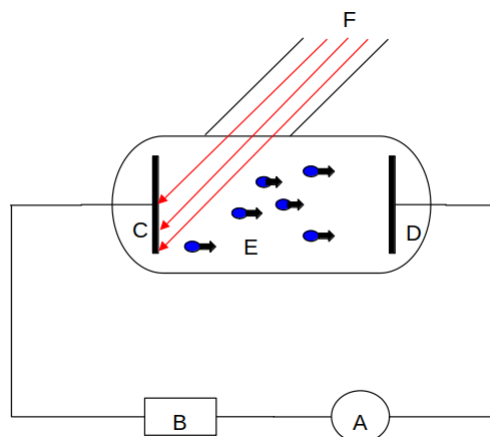
Para discutirmos isso, vamos analisar a figura (2.7):

Temos duas placas metálicas, denominadas por *C* e *D*, confinadas em um invólucro de vidro de maneira a isolá-las do meio externo. Existe uma tensão *V* aplicada com uma intensidade que pode ser modificada, além de seu sinal poder ser alterado pela chave inversora *B*. A luz incidente é uma luz monocromática¹⁵ *F*. O equipamento, denominado por *A*, é chamado de amperímetro, aparelho que mede corrente.

¹⁴ Philipp Lenard Biographical. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1905/lenard/biographical/>>. Acesso em 13 de nov. de 2019

¹⁵ Radiação eletromagnética que se encontra no intervalo de luz visível, a qual é composta por apenas uma única cor (ou frequência).

Figura 2.7 – Modelo do aparato experimental para se estudar o efeito fotoelétrico.



Eisberg (1979, p.52).

Ao incidir luz na placa metálica *C*, elétrons são ejetados, os quais são denominados *fotoelétrons*. Como temos uma tensão aplicada ao sistema, esses elétrons serão atraídos para a placa metálica *D*, devido a criação de um campo elétrico e o amperímetro fará a leitura da variação de elétrons que são atraídos por *D*, em forma de corrente¹⁶.

Há alguns pontos a se destacar nesse experimento. Primeiro, começamos pelo fato de que, sem a aplicação de uma d.d.p.¹⁷(tensão), o amperímetro já faz uma leitura de corrente. Isso nos diz que a luz por si só, faz com que elétrons sejam liberados da placa metálica *C*. Ao aumentarmos a tensão de maneira gradativa, vemos que ela irá aumentar, só que a partir de um ponto, ela fica constante, independente do valor da tensão aplicada. Portanto, isso quer dizer que sem aplicação de tensão, os elétrons são espalhados em todas as direções do espaço e ao aplicarmos uma tensão, criando um campo elétrico, todos eles são atraídos por *D*, de forma a criar um fluxo de fotoelétrons ejetados de *C* para *D*.

Para o caso em que invertemos a tensão, criamos um campo elétrico com linhas de força contrária, que irá repelir todos os elétrons ejetados de *C*. Portanto,

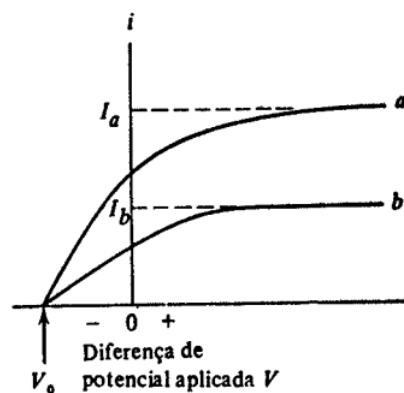
¹⁶ Lembre que a corrente elétrica é a variação de carga em um intervalo de tempo: $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$

¹⁷ Diferença de Potencial

quanto menor o valor da tensão, mais fotoelétrons são repelidos, chegando a um ponto em que a leitura do amperímetro seja 0, ou seja, nenhum elétron chega em *D*.

Porém, um caso interessante a se notar é quando usamos uma luz monocromática de intensidade diferente. Para tensões maiores que zero, o mesmo é notado pelo amperímetro, diferenciando-se de outras fontes luminosas, apenas nos valores da leitura de corrente, a qual é proporcional à intensidade da mesma. Ou seja, se for mais intensa que a anterior, a leitura de corrente também será. No entanto, ao aplicarmos uma tensão menor que zero e diminuindo-a gradativamente, vemos que terá um valor de tensão, no qual nenhum elétron chegará na placa receptora. E esse valor de tensão é igual para todas as fontes luminosas¹⁸. Então temos que, para duas fontes luminosas diferentes, a leitura de corrente cessará para um valor de tensão menor que zero ($V < 0$), semelhante entre elas, chamada de *potencial limite* ou *potencial de corte*, denominado por V_0 . A figura 2.8 mostra um gráfico, representando tais leituras.

Figura 2.8 – Dados coletados a partir da variação da tensão, para diferentes fontes luminosas.



(EISBERG, 1979, p.52)

¹⁸ Apenas fontes luminosas que fazem com que elétrons sejam emitidos da placa metálica

Robert Andrews Millikan¹⁹, ao estudar esse fenômeno, obteve dados referentes ao potencial limite e a frequência da radiação incidente, para uma placa de sódio. E para um potencial de corte V_o há uma frequência de corte, denominada ν_o (EISBERG, 1979). E, sendo que, esse potencial de corte V_o multiplicado pela carga elementar do elétron e , nos dá a medição da energia cinética do elétron mais "rápido" ejetado da placa metálica C :

$$K_{max} = eV_o \quad (2.63)$$

Dentro dessa explicação, há três pontos para os quais a física clássica não conseguia fornecer respostas, que são:

- Relação entre intensidade da fonte luminosa e energia cinética dos elétrons – ao aumentarmos a intensidade da radiação luminosa, a energia cinética dos fotoelétrons também deveria aumentar. Portanto, o que vemos, conforme eq.(2.63) é que o elétron mais energético não é dependente dessa radiação;
- Frequência da Radiação – a ejeção de elétrons de uma placa metálica, devido a incidência de luz sobre ela, deveria ocorrer para qualquer radiação. Porém, vimos que há uma frequência "limite". Para valores inferiores a este limite, o fenômeno não ocorre;
- Ejeção instantânea de elétrons – para que os elétrons fossem ejetados, seria necessário que eles adquirissem uma energia suficiente para romper as ligações químicas do material e ser ejetado. Esse processo leva um certo intervalo de tempo. Porém, o observado foi que de maneira instantânea, há a leitura de corrente ao incidir a luz. Ou seja, ao ligarmos a fonte luminosa, os elétrons já são ejetados.

¹⁹ The Nobel Prize in Physics 1923. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1923/summary/>>. Acesso em 14 de nov. de 2019.

2.5.1 Einstein e o Efeito Fotoelétrico

Anos antes do experimento de Millikan, Einstein já discutia a natureza da luz e usou o efeito fotoelétrico, como um possível meio para testar suas teorias. Como citado, de maneira diferente da academia, ele aceitou o trabalho de Planck sobre o *quantum elementar de ação*, no qual a energia da radiação incidente nas cavidades de um corpo negro são quantizadas. Além disso, essa energia se espalhava pelo espaço da mesma forma que ondas se espalham na água (EISBERG, 1979). Porém, Einstein propôs que essa energia estava concentrada em pequenos pacotes de energia, ou seja, quantizadas, o que anos posteriores veio a ser denominado de fótons.

Esse pacote de energia, está concentrado em um pequeno volume do espaço e sua energia E é proporcional à sua frequência. Além disso, ele é emitido da fonte com uma velocidade c e no efeito fotoelétrico, o processo ocorre em pares de forma que um fóton é absorvido por um único elétron. Então,

$$E = h\nu \quad (2.64)$$

Vamos analisar agora como o processo ocorre a partir das ideias de Einstein. Quando incidimos luz na placa metálica C , os elétrons são emitidos. Para cada elétron, ao ser emitido desse metal, a sua energia cinética será dada por:

$$K = h\nu - \phi \quad (2.65)$$

O termo ϕ é conhecido como função trabalho e é referente ao trabalho necessário para ejetar o elétron da superfície metálica. Pois, internamente ao material, suas ligações químicas o prendem e para superá-las e ele ser ejetado, é necessário uma certa quantidade de energia. Percebe-se que, para cada material e para cada elétron, teremos situações distintas, pois haverá ligações mais fortes ou

mais fracas. Então, o valor de K_{max} definido na eq.(2.63) é referente ao elétron de ligação mais fraca. Analisando este valor, teremos:

$$K_{max} = h\nu - \phi_o \quad (2.66)$$

Com isso proposto, Einstein conseguiu responder aos três problemas encontrados com o experimento, para os quais a física clássica não encontrava resposta. Com relação ao primeiro, no qual a energia cinética do elétron mais "energético" não depende da intensidade da luz, como proposto, a energia de cada fóton é referente à sua própria frequência. Então, aumentar ou diminuir a intensidade não muda a energia desses fótons.

No segundo problema, que é relacionado à natureza da radiação incidente, temos que quando não aplicamos tensão, o K_{max} na equação (2.63) será zero. Assim, temos que, partindo da equação (2.66)

$$\phi_o = h\nu_o \quad (2.67)$$

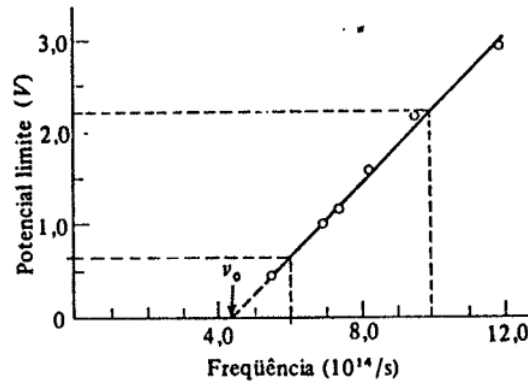
Portanto, os fótons emitidos pela radiação luminosa devem ter uma frequência ν_o para terem energia necessária para ejetar os elétrons (ou fotoelétrons). Caso a frequência dessa luz seja menor que ν_o , não haverá leitura de corrente, pois os fótons não possuem energia suficientes para "arrancar"esses elétrons da placa.

E por fim, no terceiro problema, como cada pacote fornece energia exclusivamente à um elétron apenas, ele causará a emissão deste imediatamente, pois o processo ocorre na velocidade da luz c , proposta por Einstein.

2.5.2 Análise sobre o Experimento de Millikan

Como citado acima, Millikan obteve dados experimentais referentes à incidência de diferentes fontes luminosas em placas de sódio, conforme mostra a fig. (2.9).

Figura 2.9 – Medidas de Millikan



(EISBERG, 1979, p.53)

Reescrevendo a equação (2.66), substituindo K_{max} por eV_o , conforme dado na equação (2.63), temos:

$$eV_o = h\nu - \phi_o \quad (2.68)$$

Isolando a tensão de corte na eq.(2.68), temos

$$V_o = \frac{h\nu}{e} - \frac{\phi_o}{e} \quad (2.69)$$

Substituindo (2.67) na eq.(2.69)

$$V_o = \frac{h\nu}{e} - \frac{h\nu_o}{e} \quad (2.70)$$

$$V_o = \frac{h}{e}(\nu - \nu_o)$$

Logo, temos que a tensão de corte é proporcional a frequência de corte e que o termo $\frac{h}{e}$ deve ser a inclinação da reta. Lembrando que o cálculo do coeficiente angular de uma reta é dado por:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.71)$$

Sendo, $m = \frac{h}{e}$ e usando os dados do gráfico (2.9), conforme (EISBERG, 1979), temos:

$$\frac{h}{e} = \frac{2,20V - 0,65V}{10,0 \times 10^{14}/s - 6,0 \times 10^{14}/s} = 3,9 \times 10^{-15} V.s \quad (2.72)$$

Como sabemos o valor de e que é o valor da carga elementar de um elétron, podemos encontrar o valor de h .

$$\begin{aligned} h &= e \times 3,9 \times 10^{-15} V.s & (2.73) \\ &= 1,6 \times 10^{-19} C \times 3,9 \times 10^{-15} V.s \\ h &= 6,24 \times 10^{-34} m^2 kg/s \end{aligned}$$

Esse valor estava bem próximo do valor deduzido por Planck. Portanto, com esse resultado, há a inquietação com relação ao significado dessa grandeza h encontrada, pois vemos que seu valor é semelhante ao encontrado por Planck.

2.6 Dualidade Onda Partícula – Atividade 5

A ideia agora é discutir como propriedades de partículas podem se relacionar com as propriedades das ondas. Por exemplo, as equações

$$E = h\nu \quad (2.74)$$

e

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.75)$$

nos mostram isso.

A equação 2.75 pode ser obtida a partir da seguinte relação

$$p = mv \quad (2.76)$$

Lembrando que estamos tratando de radiação luminosa, na qual são consideradas, conforme postulado por Einstein, pacotes de energia (*fótons*), que estão na velocidades da luz. Portanto,

$$p = mc \quad (2.77)$$

e a energia dessa radiação é relativística ²⁰, dada por $E = mc^2$. Assim, dividindo ambos os termos por c

$$\frac{E}{c} = \frac{mc^2}{c} \longrightarrow \frac{E}{c} = mc \quad (2.78)$$

Substituindo a eq.(2.78) na eq.(2.77), temos:

$$p = \frac{E}{c} \quad (2.79)$$

²⁰ Para maiores detalhes, consulte Eisberg (1979, p. 829), apêndice A.

Sabendo que, conforme postulado por Einstein, a energia de um fóton é dada por $h\nu$, a eq.(2.79) ficará:

$$p = \frac{h\nu}{c} \longrightarrow p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.80)$$

No Efeito Compton, houve a primeira discussão sobre a ideia da existência de uma partícula como o fóton. Pois o fóton carrega tanto momento como energia, características, até aquele momento, de partículas. E isso se verifica quando Compton tenta interpretar processos de interação entre radiação e matéria, através de leis de conservação de energia e momento. Portanto, a discussão de que a radiação não possui comportamento totalmente de partícula ou ondulatório é algo que começou a ser levado a sério!

E um cientista que o apoiou foi Maurice de Broglie. Seu irmão, Louis de Broglie, trocou de carreira, passando da história para a física, devido ao fascínio que teve pelas discussões filosóficas em torno da natureza corpuscular da radiação, provocadas por Maurice (EISBERG, 1979). Sua tese de doutorado, propôs a existência de ondas de matéria, porém, não teve alcance na academia devido a ausência de evidências experimentais para tal (EISBERG, 1979). Essas discussões foram baseadas em cima das mesmas equações (2.80) e (2.75). Sua hipótese era de que o comportamento de onda-partícula da radiação, valia também para a matéria. Então, temos que, o fóton, por exemplo, é considerado um pequeno pacote de energia (partícula), e seu movimento é regido por uma onda (no caso, uma onda eletromagnética, a luz). Temos também o caso de uma partícula, possuir um movimento que é governado por uma onda de matéria. Além disso, a partir da equação (2.80) podemos encontrar a relação de de Broglie, isolando, simplesmente, λ :

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.81)$$

E, conforme equação 2.74, podemos encontrar a energia total que está diretamente proporcional à frequência ν da onda associada ao seu movimento (EISBERG, 1979).

Nas palavras de Eisberg (1979, p. 88):

Essa equação prevê o comprimento de onda de de Broglie de uma onda de matéria associada ao movimento de uma partícula material que tem um momento p .

2.7 Modelos Atômicos

John Dalton, conhecido como o criador do modelo de "bola de bilhar", apresentou no ano de 1803, à *Literary and Philosophical Society*²¹, um artigo com o título: *Absorption of gases by water and others liquids*²².

Neste artigo, Dalton definiu alguns princípios básicos para sua teoria atômica. Dentre eles, ele apresentou que a pressão total de uma mistura gasosa é igual à soma das respectivas pressões dos gases que a constituem. Conforme Filgueiras (2004), Dalton enunciou:

Quando dois fluidos elásticos, denominados A e B, são misturados, não há qualquer repulsão mútua entre suas partículas, isto é, as partículas de A não repelem as de B, como elas se repelem umas às outras. Consequentemente, a pressão ou peso total sobre qualquer partícula deve-se apenas àquelas de sua própria espécie (FILGUEIRAS, 2004, p.).

Esse enunciado ficou conhecido como Lei das Pressões Parciais. Além disso, nesse mesmo ano, 1803, ele especificou também a lei das proporções múltiplas, que segundo Peduzzi (2008, p. 43):

Se dois elementos A e B se combinam para formar mais de um composto, o peso do elemento A por unidade de peso do elemento B em um composto é um múltiplo do peso de A por unidade do peso de B no outro composto.

Nessa época já se sabia também que combinações de diferentes elementos, geravam outros elementos, como por exemplo a reação de 12g de Carbono com 16g de Oxigênio, no qual formava-se o monóxido de carbono. A partir desse tipo

²¹ Sociedade Literária e Filosófica.

²² Absorção de gases pela água e outros líquidos.

de reação era possível inferir que a matéria possuía uma constituição atômica. Segundo Peduzzi (2008, p. 43), Dalton afirmou que :

Os átomos são corpúsculos materiais indivisíveis e indestrutíveis;

Os átomos de um mesmo elemento são idênticos em todos os aspectos;

Os átomos de diferentes elementos possuem propriedades distintas quanto ao peso, tamanho, afinidade, etc e os compostos são formados pela reunião de átomos de diferentes elementos, segundo proporções numéricas simples, tais como 1:1, 1:2, 2:3, etc.

Portanto, o modelo de *Bola de Bilhar* teve seu nome assim considerado, como base em tais considerações, que estavam associadas com o conhecimento disponível à época, no qual o átomo é maciço, indivisível e indestrutível.

2.7.1 Modelo de Thomson

Conforme Eisberg (1979), no início do século XX haviam algumas constatações de que os átomos possuíam cargas negativas, que eram os elétrons. Um exemplo é o próprio efeito fotoelétrico, apresentado anteriormente. Além disso, Dalton também já possuía conhecimento da relação entre os elementos químicos. Com isso, é possível encontrar o número de elétrons e seu peso atômico. E como os átomos são neutros, a quantidade de elétrons deve ser igual à sua carga positiva.

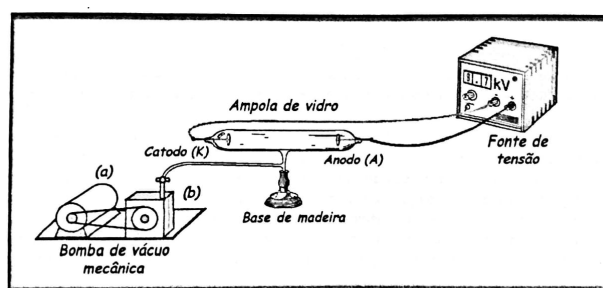
Com essas considerações, Joseph John Thomson²³, ao estudar a ampola de Crookes, desenvolvida por William Crookes, a partir dos raios catódicos, descobriu o elétron, o que lhe rendeu o nobel de 1906.

Essa ampola, era na verdade um tubo composto de duas placas metálicas cujas extremidades estão conectadas à uma tensão. Dentro dele, cria-se um vácuo parcial e aplica-se uma tensão. Percebeu-se que um raio emergia do catodo e ia

²³ The Nobel Prize in Physics 1906. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1906/summary/>>. Acesso em 18 de nov. de 2019.

em direção ao anodo e que esse raio podia defletir, caso se aplicasse um campo magnético ou se aproximasse a ampola de algum material metálico. A figura 2.10 mostra a ampola de crookes. Thomson executou alguns experimentos, os quais mostravam evidências de que esses raios eram na verdade, composto por partículas que possuem cargas elétricas.

Figura 2.10 – Aparato experimental moderno usado para investigar descargas elétricas em tubos evacuados. (a) motor elétrico que aciona a (b) câmara de expansão



Chesman, Carlos e Augusto (2004, p.7)

(CHESMAN; CARLOS; AUGUSTO, 2004) Assim, Thomson propôs um modelo, no qual as cargas negativas estariam localizadas no interior de uma distribuição esférica contínua de carga positiva (EISBERG, 1979). Como já era sabido, cargas com sinais iguais se repelem e com sinais diferentes se atraem. Então essas cargas negativas, pela repulsão entre elas, estariam distribuídas uniformemente dentro dessa esfera de carga positiva. Esse modelo levou o nome de modelo de *pudim de passas*. Nas palavras de Peduzzi (2008, p. 174):

... O átomo é constituído por uma nuvem de eletricidade positiva, distribuída uniformemente em um volume esférico, no interior da qual se acham os elétrons. A carga líquida do sistema é nula.

Esse modelo respeitava a teoria do eletromagnetismo, da emissão de radiação quando temos um corpo carregado que esteja acelerado. Porém, esse modelo não demonstrava concordância com as observações experimentais. E uma delas foi

o espalhamento de partículas α por átomos, que será discutido melhor no próximo tópico.

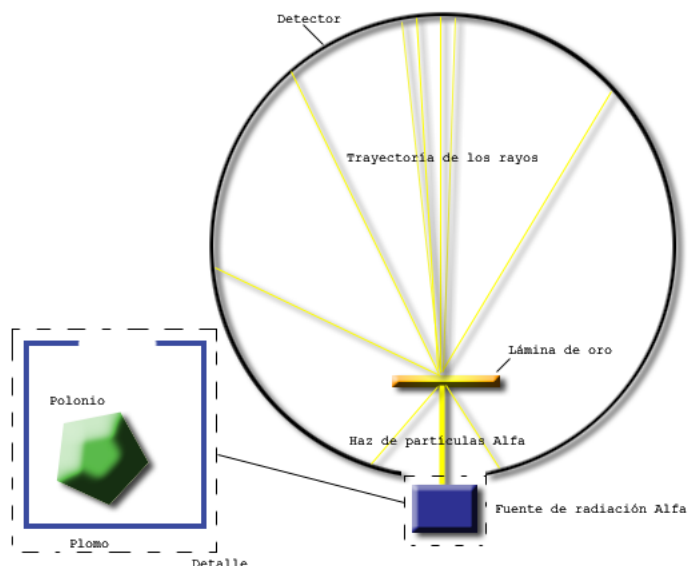
2.7.2 Modelo de Rutherford

Ernest Rutherford²⁴, ao estudar o espalhamento de partículas α através de folhas finas, formalmente conhecidas como folhas delgadas, de várias substâncias, encontrou evidências de que a proposta de Thomson não condizia com o observado.

O experimento, conforme figura (4.11), consistia de uma fonte radioativa, que emite partículas α que são incididas sobre uma folha metálica. Como dito, é uma folha fina e essas partículas passam por ela sem problemas, atravessando-a. Esse aparato experimental foi dirigido por Hans Geiger e Ernest Marsden, ambos alunos de Rutherford e que estudavam em seu Laboratório. Eles estavam desenvolvendo um novo método para contar as partículas α nos fenômenos que envolviam radiação e também explicar os resultados obtidos quando diferentes tipos de materiais eram incididos por tais radiações.

²⁴ The Nobel Prize in Chemistry 1908 . Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1908/summary/>>. Acesso em 18 de nov. de 2019.

Figura 2.11 – O experimento de Rutherford



Fonte: File:Experimento-de-Rutherford.png. Disponível em:
 <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Experimento-de-Rutherford.png>>. Acesso
 em 23 de nov. de 2019

O que eles observaram é que grande parte das partículas α atravessava a folha, porém, haviam algumas deflexões, o que os intrigou. Conforme discutido na seção anterior, para o modelo de Thomson essas partículas simplesmente atravessariam a folha, visto que o átomo é formado por uma distribuição de cargas, não havendo interferências entre as partículas e essa distribuição. Além disso, não há pontos de concentração de massa ou de cargas (PEDUZZI, 2008). Portanto, esses pontos deveriam ser considerados para explicar o modelo do átomo.

Assim, Rutherford desenvolveu um modelo "planetário" no qual há um ponto que concentra grande parte da sua massa e um outro ponto, em que se localiza uma densidade reduzida de partículas. O ponto onde se concentra a massa denominou-se núcleo e os outros pontos, onde se localizam os elétrons, que estão girando em torno dessa massa central. Porém, pela teoria clássica do eletromagne-

tismo, cargas aceleradas emitem radiação e perdem energia. O movimento então de um elétron girando em torno de um núcleo, seria de uma espiral, de forma que ele se chocaria com seu próprio núcleo (EISBERG, 1979). E se pensarmos em um elétron estático, ele irá se encontrar com o núcleo por atração coulombiana.

2.7.3 Modelo de Bohr

Niels Bohr divergia das propostas do modelo atômico de J. J. Thomson. Recém-formado, chegou a trabalhar com ele em Cambridge mas as diferenças fizeram com que mudasse para Manchester (PEDUZZI, 2008). Lá conheceu Rutherford e trabalhou em seu laboratório. De maneira similar à Ernest, realizou experimentos envolvendo a incidência de partículas α em placas finas. Porém, o modelo de Rutherford não era razoável devido aos problemas apresentados na seção anterior.

Assim, ele desenvolveu um modelo e uma teoria atômica, que ficou baseada em quatro postulados (EISBERG, 1979):

1. Um elétron se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob influência da atração coulombiana entre o elétron e o núcleo, obedecendo as leis da mecânica clássica;
2. Em vez da infinidade de órbitas que seriam possíveis segundo a mecânica clássica, um elétron só pode se mover em uma órbita na qual seu momento angular orbital L é um múltiplo inteiro de $\frac{h}{2}$;
3. Apesar de estar constantemente acelerado, um elétron que se move em uma dessas órbitas possíveis não emite radiação eletromagnética. Portanto sua energia total E permanece constante;
4. É emitida radiação eletromagnética se um elétron, que se move inicialmente sobre uma órbita de energia total E_i , muda seu movimento descontinuamente de forma a se mover em uma órbita de energia total E_f . A frequência da radiação emitida ν é igual à $E_i - E_f$ dividida por h .

Analisando estes postulados percebemos que:

- O primeiro postulado trata do núcleo, identificando sua existência;
- O segundo postulado se refere ao movimento do elétron, o qual é proporcional à constante de Planck. Logo, Bohr está quantizando o momento angular L ;
- O terceiro postulado retira o problema da instabilidade, no qual o elétron perderia energia devido ao movimento;
- O quarto postulado trata da frequência do elétron, a qual é uma grandeza dependente da energia e da constante de Planck.

Percebe-se que, mesmo com esses postulados resolvendo os problemas da estabilidade do modelo planetário de Rutherford, parecia estranho a mistura entre ideias da física clássica e essa nova área até então desconhecida da física. Pois repare que, temos uma *quantização* do momento angular, referente ao movimento orbital do elétron do elétron. No seguinte, temos uma controvérsia, no qual o elétron obedece a lei de Coulomb, porém ignora uma outra teoria da física clássica, que é a emissão de radiação devido à sua aceleração. Portanto, apesar desses pontos em específicos, Bohr conseguiu manter seu modelo estável.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo descrevemos a metodologia empregada para a realização deste trabalho. Utilizamos a proposta de um minicurso para produzir os nossos dados e, para a análise destes dados empregamos uma metodologia qualitativa, inspirada na análise temática.

Na primeira parte deste capítulo descrevemos brevemente a fundamentação teórica utilizada para a construção da proposta de atividades que compuseram o minicurso que, de maneira geral, foi inspirada nos Três Momentos Pedagógicos, como proposto por Demétrio Delizoicov e José André Peres Angotti, ambos da Universidade Federal de Santa Catarina.

Na segunda parte, abordamos o contexto em que o minicurso foi desenvolvido, além de apresentarmos o planejamento do minicurso. Ao final, abordamos os aspectos associados a análise temática, usada para discutir os dados obtidos com a realização do minicurso

3.1 Os Três Momentos Pedagógicos

Conhecer o ambiente escolar, os alunos e o seu cotidiano é algo que pode refletir diretamente no processo de aprendizagem. A proposta teórica embasada nos Três Momentos Pedagógicos (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1990) apresenta a opção de uma sala de aula com a presença de maior diálogo, seja entre os alunos, seja entre eles e os professores, considerando-se as diversas realidades presentes dentro deste espaço. A construção e reelaboração de ideias, baseadas em questionamentos, debates e problematizações é algo significativo no ambiente escolar.

A proposta dos Três Momentos Pedagógicos está estruturada em três etapas, a saber: Problematização inicial, Organização do conhecimento e Aplicação do conhecimento.

A Problematização Inicial é o momento em que, a partir de um problema inicial, os alunos devem expor suas ideias acerca de um determinado tema. A partir

dessa exposição inicial, o professor discute com os estudantes possíveis soluções. O principal objetivo é conhecer a realidade dos alunos, seus pensamentos e conhecimentos prévios acerca do tema de estudo. De acordo com os autores Delizoicov e Angotti (1990, p. 29):

Mais do que simples motivação para se introduzir um conteúdo específico, a problematização inicial visa à ligação desse conteúdo com situações reais que os alunos conhecem e presenciam, mas que não conseguem interpretar completa ou corretamente porque, provavelmente não dispõem de conhecimentos científicos suficientes.

Nesse ponto é importante que o aluno perceba que necessita de outros conhecimentos para dar uma explicação mais completa sobre o que lhe foi exposto.

A etapa de Organização do conhecimento é o momento em que ocorre a intervenção do professor, em que ele explica e define os conceitos presentes no problema formalmente. Como há a necessidade da discussão de assuntos específicos, os autores Delizoicov e Angotti (1990, p. 30) nos dizem que:

[...] será preparado e desenvolvido, durante o número de aulas necessárias, em função dos objetivos definidos e do livro didático ou outro recurso pelo qual o professor tenha optado para o seu curso. Serão ressaltados pontos importantes e sugeridas atividades, com as quais se poderá trabalhar para organizar a aprendizagem.

Cabe ao professor utilizar das mais diversas formas para o desenvolvimento deste momento, como por exemplo: aula expositiva, recursos multimídias, trabalhos redigidos, atividades experimentais, textos para debate, entre outros.

E, finalmente, a etapa de Aplicação do conhecimento é aquela em que o aluno analisa e reinterpreta o problema, após a intervenção do professor. Conforme os autores Delizoicov e Angotti (1990, p. 31) afirmam:

Destina-se, sobretudo, a abordar sistematicamente o conhecimento que vem sendo incorporado pelo aluno, para analisar e interpretar tanto as situações iniciais que determinaram o seu estudo, como outras situações que não estejam diretamente ligadas ao motivo inicial, mas que são explicadas pelo mesmo conhecimento.

Nesse momento é importante que o aluno perceba os erros cometidos no primeiro momento, comparando-os com as respostas finais, para uma melhor compreensão do problema como um todo.

3.2 Contexto da Pesquisa

Para a produção dos dados optamos pela realização de um minicurso, composto por seis encontros de uma hora e quarenta minutos de duração cada, tendo como público-alvo estudantes do segundo período do curso de Licenciatura em Física da UFLA. Os encontros foram realizados durante o segundo semestre de 2018.

A escolha do público-alvo se baseou nos objetivos da pesquisa que estão associados com a hipótese de ser possível discutir temas de Física Moderna e Contemporânea com um público que não possui os chamados "pré-requisitos mínimos" para essa discussão, isto é, pessoas que não foram expostas a uma formação matemática que as habilite a tal estudo e tópicos de físicas específicos, defasados ou inexistentes no ensino médio.

O quadro (3.1) apresenta um resumo das atividades desenvolvidas no minicurso, com seus objetivos, conteúdos e metodologias brevemente descritos. Podemos ver no quadro (3.1) que todas as aulas possuem um questionário para ser respondido ao final, individualmente ou em grupos, com o intuito de avaliar o encontro e analisar as concepções dos estudantes sobre os temas.

Como aponta Bardin (1977, p. 101).

A fim de analisar os dados obtidos, o analista, tendo à sua disposição resultados significativos e fiéis, pode então propor inferências e adiantar interpretações a propósito dos objetivos previstos, ou que digam respeito a outras descobertas inesperadas.

Além disso, a estrutura das aulas, em sua maioria, apresenta uma problematização inicial seguida por uma investigação, via simulador computacional, ou atividade experimental, com o uso de grupos colaborativos. A ideia de se usar grupos, como proposta por Damiani (2008, p. 220), é promover a interação entre os alunos e a troca de conhecimento, como apresentado na teoria vygotskyana, com o objetivo de promover o desenvolvimento cognitivo dos estudantes.

Quadro 3.1 – Descrição das atividades desenvolvidas no minicurso, com especificação dos seus objetivos, conteúdos e metodologias.

Atividades	Objetivos de Ensino	Conteúdos	Metodologia
Do mundo macro ao mundo micro	Discutir as diferentes interpretações dos fenômenos físicos nas escalas macro e micro.	Status das áreas de Física, Química, Biologia, História, Filosofia e Sociedade com relação ao desenvolvimento científico, no final do século XIX e início do século XX.	Exposição dialogada com o auxílio de vídeos e slides. Avaliação através de um questionário.
Interação Radiação-Matéria: o problema da Radiação do Corpo Negro	Introduzir a problemática da interação radiação-matéria do ponto de vista da física	Conceitos de Ótica, Estrutura da Matéria e de Termodinâmica.	Atividade Experimental e discussão dos resultados.
A constante de Planck e o problema da Radiação do Corpo Negro	Desenvolver e discutir o problema da radiação do corpo negro. Apresentar o trabalho de Planck e como ele resolveu o respectivo problema.	Conceitos de Ótica, Estrutura da Matéria e de Termodinâmica.	Exposição dialogada com o auxílio de simulador computacional. Avaliação através de um questionário e das discussões realizadas.
O Efeito Fotoelétrico	Apresentar e discutir o Efeito Fotoelétrico. Introduzir a problemática da dualidade onda-partícula.	Conceitos de Eletricidade, Óptica e Estrutura da Matéria	Exposição dialogada com o auxílio de simulador computacional. Avaliação através de um questionário e das discussões realizadas
Dualidade onda-partícula	Apresentar e discutir o Efeito Compton e o Postulado de De Broglie. Discutir o problema da fenda dupla. Apresentar o Princípio da Incerteza.	Conceitos de Ondulatória e Óptica	Exposição dialogada com o auxílio de datashow. Problemática a partir de um experimento mental. Avaliação através de um questionário e das discussões realizadas.
Modelos atômicos e a estabilidade da matéria.	Refletir sobre as atividades passadas e discutir o objetivo de se criar modelos. Apresentar e desenvolver os modelos atômicos.	Conceitos de Estrutura da Matéria. Eletromagnetismo.	Exposição dialogada com auxílio de datashow. Avaliação através das discussões realizadas.

Ao término de toda aula, foi feito um relato pelo autor, levantando as principais discussões realizadas em sala de aula, referentes aos tópicos discutidos.

A seleção desses tópicos foi baseada no objetivo do trabalho, que era discutir a possibilidade da inserção de temas de FMC no ensino médio ou para públicos sem os pré-requisitos normalmente exigidos para isso. Os temas das atividades foram selecionados, conforme aulas de FMC ao longo da graduação do autor. Além disso, as temáticas possibilitam avaliar alguns tópicos básicos de física necessários para o desenvolvimento destes, tais como: comprimento de onda, frequência, energia, calor, temperatura, entre outros.

Durante a análise dos questionários, foram levantados em consideração, os tópicos citados no parágrafo anterior. As respostas foram divididas em grupos, de forma a levantar as diferentes concepções que os estudantes apresentavam sobre cada um dos temas da referente aula. Foi feita a cópia de algumas respostas, selecionadas pelo autor, que mais chamaram a atenção dentro de cada grupo de respostas. E, de forma a não divulgar o nome do estudante, mantendo a privacidade dos participantes, foi dado para cada um, uma identificação através de números: aluno 1, aluno 2 e etc.

3.3 Análise Temática

A avaliação dos encontros foi realizada pela reflexão em cima da narrativa da aula e por meio da investigação dos questionários respondidos pelos alunos, os quais podem nos mostrar tendências e as concepções, dos pré-requisitos necessários, dos estudantes ingressantes no curso. Portanto, trata-se de uma pesquisa qualitativa e a análise temática é uma das formas para se investigar esse tipo de pesquisa (BARDIN, 1977).

Tendo como inspiração este referencial, temos uma estrutura metodológica a seguir para a análise nesse tipo de pesquisa, que é composta das seguintes etapas:

- Pré-análise;

- Exploração do Material;
- Tratamento dos resultados e interpretação.

Na análise dos questionários referentes aos cinco encontros¹ aplicados com esse grupo de estudantes ingressantes no curso de Licenciatura em Física, utilizamos a análise temática.

Ao longo dos encontros foram registradas as discussões mais relevantes, os questionamentos realizados pelos estudantes e os pontos nos quais sentíamos que havia uma necessidade maior de outras explicações ou maiores discussões. Depois dos encontros, a aula era transcrita de forma a ser uma narrativa, destacando-se os pontos supracitados e, juntamente com essas narrativas, os questionários foram analisados. Algumas respostas e alguns textos (referente à aula 3) foram transcritos mantendo a escrita original do aluno de forma a corrigir, apenas, erros gramaticais. Além disso, também não foi feita a correção de conceitos físicos.

Portanto, nessa análise seguimos a metodologia da análise temática, distribuída nas seguintes etapas:

1. Pré-análise – o primeiro passo foi realizar a chamada "leitura flutuante", que implica em conhecer inicialmente o material e criar familiaridade com ele. Além disso, o objetivo dessa primeira fase é gerar impressões iniciais acerca do material a ser analisado (BARDIN, 1977). Nessa etapa, também deve-se providenciar elementos e indicadores de marcação, os quais permitem extrair das interações textuais os pontos principais. É nesta etapa que há as operações de recorte do texto em unidades comparáveis de categorização para análise temática e de algumas das modalidades de codificação para o registro dos dados;

¹ No último encontro nós não tivemos o questionário.

2. Exploração do Material – nesta etapa ocorreu a descrição mais detalhada do material transcrito. Além disso, foi realizada também uma divisão nesse material de forma a gerar uma categorização dos tópicos (ou temas).
3. Tratamento do Resultados e Interpretação – Conforme Bardin (1977, p. 101) “o analista, tendo à sua disposição resultados significativos e fiéis, pode então propor inferências e adiantar interpretações a propósito dos objetivos previstos, ou que digam respeito a outras descobertas inesperadas”. Portanto, os resultados obtidos a partir da transcrição dos encontros foram analisados de forma a serem significativos e terem um significado diante dos objetivos do presente trabalho. O pesquisador pode fazer operações estatísticas, simples ou até complexas, que possibilitem condensar e pôr em destaque as informações fornecidas pela análise Bardin (1977, p. 127). Com isso, foram levantados os tópicos mais discutidos em cada encontro e que tiveram presença maior em cada questionário, de forma a categorizar os temas mais relevantes para as referentes atividades.

No capítulo seguinte apresentaremos os relatos e algumas reflexões obtidas a partir dos dados, inspiradas na análise temática.

4 RELATOS E REFLEXÕES

Neste capítulo apresentamos os relatos sobre cada uma das atividades desenvolvidas no minicurso, bem como algumas reflexões sobre este desenvolvimento. Também são apresentados alguns dados extraídos das produções dos estudantes e das minhas anotações do autor, usados para corroborar ou refutar as discussões.

4.1 Atividade 1 - Do Mundo Macro ao Mundo Micro: uma discussão embasada no contexto histórico

Esta atividade tinha como objetivos fazer a apresentação da proposta de trabalho aos estudantes, e também investigar a presença de conhecimentos iniciais sobre temas de Física Moderna. Além disso, verificar se os estudantes já tinham tido algum contato com estes temas durante a formação escolar anterior.

Para isso, utilizamos um conjunto de slides e uma problematização inicial, com o intuito de gerar uma discussão sobre alguns conceitos da física clássica.

A atividade foi estruturada em três momentos específicos e foi planejada a partir dos seguintes objetivos de ensino:

- Objetivos
 - ★ Apresentar a proposta de trabalho para os participantes;
 - ★ Fazer uma discussão inicial sobre a descrição do mundo microscópico do ponto de vista da Física, contrastando com a descrição do mundo macroscópico;
 - ★ Discutir o contexto socio-histórico-cultural que vigorava quando a Física Moderna dava seus primeiros passos.

O quadro (4.1) apresenta um detalhamento da atividade 1.

Quadro 4.1 – Detalhamento da atividade 1, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa da atividade.

Momentos	Duração	Descrição
1	20 min	Apresentar a proposta de trabalho; Revisitar alguns conceitos da Mecânica Clássica; Discutir as mudanças nas descrições físicas quando se lida com fenômenos envolvendo altas velocidades; Discutir as mudanças nas descrições físicas quando se lida com fenômenos envolvendo o mundo microscópico.
2	50 min	Discutir como a ciência se desenvolveu nos dois últimos séculos; Apresentar a concepção de que a ciência é construída arduamente por várias pessoas; Discutir como a sociedade se comportava e como as ideias da época influenciaram no desenvolvimento da ciência. Apresentar os problemas físicos em aberto nesse período: corpo negro, efeito fotoelétrico, raios espectrais, modelos atômicos, etc..
3	30 min	Verificar, através de um questionário, como os estudantes ingressantes e de períodos iniciais do curso entendem a Física Moderna; Verificar se os estudantes desenvolveram conteúdos dentro dessa temática em seus anos no Ensino Médio.

Fonte: Autor (2019).

4.1.1 Momento 1

Como este foi o primeiro contato com a turma, iniciei fazendo uma pequena apresentação pessoal, abordando basicamente os motivos de ter ingressado na vida acadêmica, justificando a minha escolha pela física, e o que pretendo levar comigo, através dessas experiências, que é a possibilidade de desenvolver um mini curso envolvendo tópicos de física moderna. Como estes temas são praticamente ausentes nas salas de aula e tive, até o momento, apenas formação teórica sobre eles, expliquei que seria uma oportunidade de formação inicial para mim e que, para eles também, seria uma forma de pensar sobre o desenvolvimento desses temas, em suas futuras atividades, aulas ou ações em estágios ou projetos. Também discuti a justificativa do trabalho e suas possíveis implicações para o Ensino de Física, visto que serão abordados temas que, de modo geral, não estão presentes nas salas de aula da Educação Básica.

Posteriormente, apresentei os objetivos do minicurso. Os estudantes não se mostraram surpresos pois o professor da disciplina já havia conversado com eles sobre a realização deste trabalho. Além disso, eu já conhecia alguns dos estudantes da turma.

A primeira questão apresentada à turma foi se eles já tinham ouvido falar sobre Física Moderna e o que vinha em suas mentes ao falarem sobre isso. Quase que de forma unânime, eles mencionaram Albert Einstein e os diversos avanços da astronomia, tais como os estudos sobre buraco negro, buraco de minhoca, viagens espaciais, entre outros. Algumas respostas foram interessantes. Por exemplo, um estudante mencionou que já tinha pensado, ao estudar óptica, sobre o comportamento e a natureza da luz, tentando entender se ela possui massa e se ocupa espaço. Um outro estudante mencionou sobre as tecnologias usadas para o desenvolvimento da astronomia, como os telescópios.

Como problematização inicial, foi exibido um vídeo¹ que mostrava um carro, inicialmente em repouso, e que acelerava ao longo de uma reta, até atingir 400 km/h. Ao atingir essa velocidade, ele freava bruscamente, até parar. A partir da exibição do vídeo, pedi que eles identificassem a presença de algumas grandezas físicas naquela cena. Sem muitas dificuldades, eles identificaram no vídeo algumas grandezas da física clássica, tais como: aceleração, velocidade, força, atrito, entre outras e, a partir dessas grandezas, mencionaram como seria possível obter informações sobre a aceleração e a frenagem do carro. Os estudantes deveriam especificar como calculamos a aceleração e a energia gerada pelo carro, bem como a desaceleração que ele promove após alcançar os 400km/h , abordando, para isso, vários tópicos de mecânica, usualmente estudados no primeiro ano do ensino médio.

¹ BUGATTI Chiron 0-400-0 km/h in 42 seconds – A WORLD RECORD # IAA2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=PkkV1vLHUvQ>>. Acesso em 25 de set. de 2018.>

A partir dessas discussões iniciais esperávamos que os estudantes recordassem como a física clássica descreve os fenômenos envolvidos na situação apresentada. Na sequência, apresentei a problematização, tendo como base dois casos extremos, ambos baseados no exemplo do carro, que estão descritos a seguir.

- *E se o motor desse carro pudesse desenvolver uma potência, a partir da qual ele conseguisse alcançar velocidades tão altas, que chegasse próximo à velocidade da luz? Os conceitos físicos seriam os mesmos da situação inicial, onde ele acelerou, a partir do repouso até os 400 km/h?*
- *Pensem em uma outra situação. E se esse carro fosse uma partícula, do tamanho próximo ao de um grão de açúcar, por exemplo? A descrição física seria a mesma?*

O nosso objetivo com esses dois casos era discutir os resultados que a física clássica apresenta, refletindo se eles fazem sentido e se podem ser considerados corretos quando aplicados a situações semelhantes às que foram apresentadas nas duas problematizações.

Também ressaltamos os conceitos de velocidade, força, aceleração, entre outros que surgiram nas discussões e que aparecerão nos encontros futuros.

A maioria dos estudantes acreditava que as respostas seriam diferentes às obtidas pela física clássica. Inclusive, alguns deles citaram a relatividade para a descrição do movimento do carro quando ele estivesse próximo à velocidade da luz. Mas, quando o problema foi levado para o mundo microscópico, não foram obtidas respostas que mostrassem alguma percepção das mudanças necessárias para descrever essa nova situação. O mundo do muito pequeno se mostrou uma novidade para a turma. Isso foi uma surpresa, pois na primeira problematização quase todos identificaram os problemas envolvidos e que eles estavam relacionados com a relatividade e, na minha expectativa, o mesmo ocorreria para o segundo questionamento.

No entanto, devemos lembrar que todo o estudo que esses alunos realizaram sobre a Mecânica, no Ensino Médio, levava em conta o fato dos corpos poderem ser descritos como partículas, pontos materiais, sem dimensões. Será que isso pode gerar um conflito quando começamos a tratar o mundo microscópico de fato, quando começamos a falar das partículas que compõem a matéria?

A partir dessas discussões iniciais é possível afirmar que há uma certa familiaridade por parte dos alunos com conceitos de relatividade e o mesmo não ocorre para as descrições quânticas.

Em seguida, dei um exemplo de algo familiar a todos, envolvendo movimentos com grandes velocidades, que foi o GPS (Global Position System) e que a física clássica sozinha encontra dificuldades para explicar. Expliquei o funcionamento básico do GPS, que tem como objetivo repassar informações a um objeto móvel, celulares em geral, que estão dentro de carros ou até mesmo em nossas mãos, com uma velocidade muito grande, na verdade as informações são transmitidas na velocidade da luz. Devido a essa alta velocidade, o GPS deve possuir um sistema que sincronize seu tempo com o do receptor e isso é feito usando a Relatividade de Einstein, já que a relatividade clássica não resolve tal problema. A ideia era mostrar à eles que a relatividade não fica apenas no ramo das ideias e que há aplicações no cotidiano, visto que, pelo que já disse anteriormente, a turma aparentou possuir algum conhecimento sobre isso.

Para o caso de corpos muito pequenos, falei sobre o espalhamento de nêutrons, que não envolve velocidades relativísticas, mas que, por outro lado, envolve dimensões microscópicas. E é o fato de serem muito pequenos, que requer uma nova física para descrevê-los.

Durante a exposição desse tema houve um silêncio na sala, diferentemente dos primeiros questionamentos sobre velocidades muito altas. Isto pode ter ocorrido, ou por desconhecimento total sobre estes fatos ou porque a exposição dos

dois slides tenha sido desinteressante, já que esses slides acabaram sendo meramente expositivos, não facilitando uma discussão com a turma.

4.1.2 Momento 2

Nesse momento fiz uma apresentação, novamente com o uso de slides, abordando os aspectos históricos, sociais, econômicos e políticos para o período entre final do século XIX e anos iniciais do século XX, tendo como base o que foi apresentado na seção (2.2).

O objetivo neste momento era conectar o desenvolvimento tecnológico com o desenvolvimento da ciência, dando destaque para o descompasso entre estes conhecimentos em alguns momentos da história da humanidade. Queria também apontar os aspectos sociais e políticos, destacando as mudanças na sociedade ocorridas dentro do período analisado; investigar o que estava acontecendo com as outras áreas da ciência, tais como a química e a biologia, principalmente. Ao final, destacar que existiam alguns problemas que intrigavam a todos e os conhecimentos da época não eram suficientes para respondê-los. Um desses problemas era o problema do Corpo Negro, como ficou conhecido, originado a partir do desenvolvimento da indústria siderúrgica.

Na continuidade da aula, voltamos ao problema do carro e levantei a discussão para os estudantes sobre quais ramos da física são necessários mobilizar para se fabricar um carro tão moderno e com tanta tecnologia como aquele que foi apresentado no vídeo. Alguns falaram da mecânica, outros da óptica (o mesmo aluno do início), outros da física térmica (motor) e ainda da parte elétrica. A partir das respostas, tentei ao máximo formalizá-las, dando nomes mais específicos. Feito isso, questionei a eles se é necessário ter conhecimento de uma física ultra, super moderna, para desenvolver e construir um carro do século XXI, ou se basta uma física já conhecida de séculos passados. Eles reconheceram prontamente que o que utilizamos, de maneira geral, é uma física já desenvolvida há muito tempo.

Usando essa discussão como ponto de apoio, perguntei a eles se a física era limitada a apenas essas áreas ou se haveriam mais ramificações. Novamente, houve um silêncio total. Para provocar alguma discussão, expus a eles que essa física que está presente no carro (mecânica, termodinâmica, óptica e eletromagnetismo) faz parte de um pacote na física, que é denominado de Física Clássica, e voltei a pergunta anterior, indagando se há outro pacote, com outras áreas na física. Nesse momento houve um certo “burburinho” na sala. Foi possível ouvir termos como: “Relatividade, Mecânica Quântica, Astronomia...”. Apresentei então o “pacote”, onde de fato, está a relatividade e a física quântica, informando a eles que esse “pacote” todo é denominado Física Moderna.

Apesar de inicialmente haverem exitado dar respostas sobre esse novo "pacote", não ficaram muito surpresos com ele, pois aparentemente já tiveram algum contato (documentário ou série) ou pelo menos demonstraram ter algum conhecimento superficial sobre essas áreas. Mas, como dito anteriormente, houve um breve silêncio na sala quando a discussão se voltou para a física do muito pequeno, denotando uma certa desconexão ou desconhecimento sobre essa área.

Feito isso, levantei outra discussão a partir da definição desse novo “pacote” chamado Física Moderna. Esse conhecimento é algo novo, desenvolvido nos anos 2000? A turma identificou que não era algo novo e alguns mostraram ter conhecimento da linha cronológica de desenvolvimento desses temas. Nesse momento dei início a uma exposição do contexto histórico² do final do século XIX e início do século XX, onde ocorreram as divisões de classes, a Revolução Industrial, o desenvolvimento de novas teorias em diversas outras áreas da ciência, tais como: o evolucionismo de Charles Darwin, o Positivismo de Comte na filosofia e a transição do Romantismo para uma visão mais realista do homem (Realismo), na literatura. Discuti com eles que esse foi um período de intensa mudança no mundo, nas diversas áreas, e a ciência, com toda essa transformação da socie-

² Tomando como base o texto apresentado na seção (2.2).

dade, acompanhou tais mudanças. Surgiram alguns comentários interessantes, tais como:

Na idade média houve algo parecido né? Época do Galileu!

Segunda Guerra, com o desenvolvimento da bomba nuclear. . .

Acho que para a física criar novas áreas ou avançar, talvez uma nova guerra faria isso ocorrer. (Alunos da turma 18A, GEX190/UFLA)

Por fim, entreguei aos estudantes um questionário levantando questionamentos sobre alguns tópicos da física e do ensino de física e também abordando o conteúdo discutido durante esta primeira atividade.

4.1.3 Momento 3

Para finalizar a atividade, os estudantes responderam, individualmente, a um questionário sobre os conceitos discutidos, com o intuito de coletar as concepções desenvolvidas sobre o tema e outras que eles já possuíam.

4.1.4 Análise das Respostas ao Questionário

Nessa seção apresentamos algumas das respostas dos estudantes ao questionário trabalhado ao final da atividade 1, que era composto por 8 questões e que foi respondido por 15 estudantes.

Selecionamos algumas respostas dos estudantes que chamaram a atenção, com uma breve discussão sobre cada uma delas, levando em conta os objetivos da atividade.

Questão 1

Quais foram as discussões realizadas durante as aulas de Física ao longo do Ensino Médio que foram mais marcantes para você? Você se lembra de alguma delas? Em caso afirmativo, especifique-as brevemente.

Nas respostas a essa questão podem ser destacados alguns pontos. Por exemplo, dos 15 alunos que responderam a esse primeiro questionário, 2 deles não identificaram discussões realizadas durante as aulas de Física no Ensino Médio que pudessem ser consideradas marcantes, além disso, possuem como lembranças das aulas de física apenas fórmulas, memorização e a falta de interesse dos alunos:

“Poucas discussões, muita decoreba, muitas fórmulas, pouco conteúdo”. (Aluno 14)

“Não consigo me lembrar de qualquer discussão marcante devido a péssima qualidade das aulas que em grande parte era motivada pela falta de interesse dos alunos”. (Aluno 11)

Nos outros 12 questionários há uma certa repetição entre os temas citados por eles que, de certa forma, incluem as grandes áreas da Física. Foram selecionadas algumas respostas para exemplificar o tipo de memória que esses estudantes demonstraram possuir sobre os estudos iniciais de Física, separadas por grandes áreas:

- Mecânica/Astronomia: Em grande parte das respostas, há a citação de estudos sobre o movimento e, em um deles, aparece explicitamente uma menção à dinâmica. Há também alguns que se lembram das leis de Newton sem muitas especificações, citando-as apenas. Não fica claro se eles conseguiram compreender estes conceitos. Isso aparece nas respostas dos Alunos 10 e 5:

"Nada tão marcante. Força peso, mecânica, leis de Newton".
(Aluno 10)

"As discussões sobre as leis de Newton, a eletricidade e a temperatura". (Aluno 5)

Já o Aluno 8 relacionou astronomia com alguns outros tópicos, sem explicitar claramente as conexões:

"Astronomia, movimentos, história da eletricidade, ótica. Na astronomia foi o movimento dos astros, em movimentos de carros e até mesmo partículas, na história da eletricidade, a questão de que energia elétrica era considerada como um elemento em fluído e ótica sobre a visão da relatividade geral". (Aluno 8)

- Termodinâmica: em apenas 3 questionários aparecem menções explícitas sobre o estudo da termodinâmica e da temperatura. O Aluno 2 apenas relacionou este estudo com o processo de transformação de energia, de uma maneira bem geral.

"Termodinâmica, que relaciona transformação de energia".
(Aluno 2)

- Óptica: de maneira semelhante às Leis de Newton, não foram dadas maiores explicações por eles sobre os estudos de óptica, porém o Aluno 7 mencionou que em suas aulas fez uso do simulador PhET.

"Estudo de Óptica, o professor usou simuladores do PhET e tentou nas aulas ser o mais dinâmico possível". (Aluno 7)

- Eletricidade/Eletromagnetismo: dos 15 questionários, 9 continham alguma referência sobre elétrica, eletricidade ou eletromagnetismo. Nos questionamos se de fato as aulas de física, em especial os tópicos de eletricidade e eletromagnetismo, tiveram essa presença marcante mesmo na formação desses estudantes ou se o fato desse tema ser abordado no terceiro ano do Ensino Médio contribuiu para que eles se lembrassem desses tópicos. Mas de novo, não mencionaram nada muito específico. Apenas o Aluno 8, que

relacionou eletricidade a um fluido, como se pode verificar na citação acima, no item Mecânica/Astronomia).

Das respostas podemos verificar que não aparece nenhuma menção à temas de Física Moderna e Contemporânea, dando a entender que esses temas ou estiveram ausentes ou não chamaram a atenção desses estudantes. O que corrobora a nossa suposição inicial de que esses temas de fato estão ausentes da sala de aula da educação básica, de maneira geral.

Questão 2:

O que você considera mais importante na Física que aprendeu no Ensino Médio? Porque? Dê exemplos do seu cotidiano que estejam relacionados com esses conteúdos.

De maneira semelhante à pergunta anterior, a análise foi dividida em tópicos. Dos 15 questionários, 4 não se referem a nenhuma área como sendo a mais importante, mas sim o conhecimento como um todo e, para um deles, o Aluno 14, o que ele aprendeu foi apenas manipular fórmulas e obter resultados numéricos. Algumas respostas dos alunos que evidenciam isso, estão transcritas a seguir.

“Tudo que aprendi foi um grande conhecimento para mim”. (Aluno 2)

"Olha eu só aprendi a decorar formula, jogar os dados e conseguir o resultado". (Aluno 14)

"Todas as áreas estudadas são de igual importância. A Física está presente em quase tudo: no nosso andar, nossa visão, nos aparelhos eletrônicos utilizados no dia-a-dia, nos esportes que praticamos, nos instrumentos, etc". (Aluno 13)

"Considero tudo que aprendi importante. Pois tudo esta presente em nossa (palavra desconhecida) à Física e presente em nossa vida". (Aluno 1)

É possível perceber que esses estudantes conseguem interpretar a física como um todo, em que todas as áreas são importantes e estão relacionadas umas com as outras.

Dos 11 questionários restantes, 7 se referem a Mecânica/Astronomia, sendo que apenas 1 faz menção específica à Astronomia, 1 faz menção a Termodinâmica e 3 falam sobre Eletricidade/Magnetismo. Selecionamos algumas falas dos Alunos para ilustrar esse ponto.

"O contato com a astronomia foi o divisor de águas entre minha total falta de interesse para total interesse. Gosto de discutir questões existenciais e a física/astronomia me supri bastante". (Aluno 11)

Dentre os que mencionaram a Mecânica, chama a atenção o fato deles conseguirem conectar com situações cotidianas.

"Mecânica cinética pois estuda os movimentos e isso se aplica diretamente em nossas vidas". (Aluno 7)

"Os estudos sobre velocidade, distância e tempo. Em uma viagem consigo calcular o tempo de viagem". (Aluno 5)

"Realização de ter ideia da velocidade e de ter uma visão melhor na sinuca". (Aluno 6)

Dos que mencionaram Elétrica/Eletromagnetismo, chama a atenção dois deles que justificam suas escolhas a partir do uso no cotidiano e que este estudo possibilitou sua inserção no mercado de trabalho.

"Elétrica, pois foi fundamental para minha inicialização no mercado de trabalho". (Aluno 12)

"Não que eu considere o mais importante, mas como citado acima a eletricidade é o que consigo relaciona funcionalmente no dia dia". (Aluno 4)

Na fala do Aluno 4 fica evidente o argumento da aplicabilidade e dos benefícios da eletricidade na sociedade.

Questão 3

Quais são as grandezas importantes para descrever o movimento do carro no vídeo apresentado no início da atividade?

A maioria da turma respondeu corretamente, apresentando as grandezas que se utilizam na Física, nos estudos do primeiro ano do Ensino Médio: distância percorrida, velocidade média, aceleração e energia. Alguns estudantes responderam ainda com alguns tópicos de Eletromagnetismo e Termodinâmica, o que creio, tenha sido uma pequena confusão criada durante a apresentação, na qual citei essas áreas como estando presente no desenvolvimento tecnológico de um carro. Essa confusão fez com que alguns acabassem respondendo que Eletromagnetismo e Termodinâmica também estão presentes, o que de fato não está errado.

Porém, nessa questão percebi um ponto importante, associado com os conceitos de deslocamento e distância. Alguns responderam deslocamento, enquanto outros mencionaram distância percorrida. Será que eles têm conhecimento da diferença entre essas grandezas? Fica a dúvida. Alguns ainda citaram espaço.

Questão 4

Você considera importante a reflexão sobre os aspectos históricos e sociais no estudo das ciências? Porque?

Nessa questão, pelas respostas dos alunos, foi possível perceber que eles entendem que há uma relação direta entre o contexto histórico e o presente, no desenvolvimento das ciências e da tecnologia. Além disso, demonstraram possuir uma noção de como determinada teoria científica ou lei foi desenvolvida e suas motivações, e como isso tudo influencia diretamente na sociedade.

Pelas respostas, eles demonstraram também ter entendimento que o contexto histórico é importante e rico para discussões de tópicos de física, na medida em que influencia o desenvolvimento de novos conceitos. Seguem alguns exemplos que corroboram essa afirmação:

"Sim, muito, porque o contexto influencia o pensamento das pessoas". (Aluno 14)

"Sim, pois mostra o quanto evolui ao decorrer do tempo e que na maiorias das vezes cada parte completa a outra". (Aluno 7)

"Sim. Através deles conseguimos entender os fatos, as descobertas de hoje". (Aluno 5)

"Sim, é importante para mim entender o contexto em que cada lei foi inserida, justamente para entendermos a justificativa para tal". (Aluno 8)

"Sim, o contexto histórico de tudo diz muito sobre o que aconteceu na época, até as reações da sociedade com o ocorrido são bem explicadas por ele". (Aluno 3)

Questão 5

Em sua concepção, a filosofia e as ciências sociais se relacionam com as ciências da natureza, como a Física, por exemplo? De que maneira?

Nesta questão, percebi uma certa dificuldade dos alunos em relacionar a filosofia, a sociedade e as ciências sociais, com as ciências biológicas e as ciências exatas. Todos responderam que elas se relacionam e que, de certa forma, se complementam. Alguns exemplos desse tipo de pensamento estão transcritos a seguir:

"Na minha opinião ciência é uma coisa apenas, ciências da natureza, social eu acho que é tudo interligado a ciência é única". (Aluno 14)

"Sim. Pois é extremamente necessário a filosofia para se entender a física, sendo a física o estudo dos fenômenos da natureza e o ser humano esta diretamente ligado ao meio-ambiente". (Aluno 7)

"Sim, uma vez que, como as ciências sociais implicam justamente nas ideias e linhas de pensamento em cada contexto, acredito eu que elas se relacionam, principalmente como pontapé inicial para os desenvolvimentos científicos". (Aluno 8)

"Sim, os primeiros observadores da natureza foram os filósofos, que tentavam explicar o funcionamento do universo por meio da razão". (Aluno 15)

"Sim; vem como complemento dos estudos". (Aluno 2)

"Sim, em toda questão social como um complemento para as ciências da natureza, mais voltada à preocupação com o próprio ser humano". (Aluno 13)

Pelas respostas, percebemos que os alunos tem uma breve noção de que as questões sociais se relacionam de maneira direta com o desenvolvimento tecnológico, que a filosofia não fica restrita apenas à reflexão e existência do ser humano mas que ela é construída também para auxiliar o desenvolvimento do pensamento científico. Assim, essas áreas, sociologia, filosofia e física, possuem laços em comum, contribuindo para o desenvolvimento humano e da sociedade.

Questão 6

Quando é mencionado o termo mecânica quântica, o que vem em sua mente?

Dos 15 alunos, 10 relacionaram o termo com o estudo do mundo muito pequeno, enquanto os outros 5 demonstraram não ter conhecimento de tal termo, o que fica evidenciado pelas seguintes afirmativas:

"Teorias feitas pelos cientistas". (Aluno 2)

"Teorias feitas por Galileu, Newton, moléculas, fenômenos macroscópicos etc". (Aluno 1)

"Curiosidade, vejo o tempo que perdi com uma física que não corresponde a realidade e fico ansioso para aprender o certo até o momento". (Aluno 14)

Foi possível perceber que a maioria da turma identificou o termo com o estudo do mundo muito pequeno³, o que fica evidenciado pelas seguintes respostas:

"O estudo de coisas na física que estão abaixo ou no nível atômico das moléculas". (Aluno 9)

"O estudo profundo sobre átomos, elementos abaixo da escala atômica". (Aluno 5)

"Nanopartículas, o estudo delas". (Aluno 3)

Esse resultado pode simplesmente estar associado com o fato de termos falado sobre isso ao longo da atividade e não que eles tenham este conhecimento de experiências anteriores.

Questão 7

Já é consenso que temas de Física Moderna são pouco ou mesmo nem abordados em salas de aula do Ensino Médio. Porque você acha que isso ocorre?

Nessa questão surgiram respostas que apontavam algumas razões para a baixa presença dos temas de FMC nas salas de aula: complexidade do tema, planejamento do professor e carga horária disponível para a disciplina e a própria formação dos professores.

³ Conforme mencionado anteriormente, quando fizemos os questionamentos acerca da física do mundo muito pequeno, não obtivemos muitas respostas. O assunto lhes parecia novo e não sabiam muito o que questionar ou discutir sobre ele, apesar de já terem ouvido falar.

Quatro alunos relacionaram a complexidade dos tópicos à sua ausência no Ensino Médio. Pelas respostas, eles acreditam que a escola não oferece uma base para que eles estudem tais tópicos. Os Alunos 15 e 7 dizem que:

"Porque são relativamente complexos". (Aluno 15)

"Pois são mais complexos e exigem uma base boa, que na maioria das vezes a escola não oferece". (Aluno 7)

Já o Aluno 13 respondeu que, apesar disso, há uma forma de se discutir tais tópicos de uma maneira mais compreensível.

"Ocorre devido ao fato de que a Física Clássica explica muito bem algumas questões, além da Física Moderna parecer mais complexa (podendo ser apresentada de uma forma mais compreensível no Ensino Médio)". (Aluno 13)

Cinco alunos relacionaram a ausência dos temas de Física Moderna no Ensino Médio ao planejamento que os professores seguem:

"Porque os professores recebem um plano a ser seguido que não se atualiza as mudanças". (Aluno 2)

"Porque os professores seguem um planejamento, e por não se adequar as mudanças". (Aluno 1)

Houve também um aluno que citou a preocupação presente no Ensino Médio com os processos seletivos para ingresso nas Universidade, o que de certa forma, prejudica a inserção de FMC em sala de aula. Na opinião do Aluno 3.

"Pelo tempo que temos no ensino básico em física e também pela grande maioria das escolas passarem somente (e prepararem) os alunos para fazer os vestibulares". (Aluno 3)

Três alunos relacionaram a ausência de Física Moderna no Ensino Médio à má formação dos professores ou ao desconhecimento deles sobre tais temas.

"Porque os educadores ainda não tem um grande conhecimento a respeito". (Aluno 5)

"Por falta de aprofundamento ao assunto por parte dos profissionais". (Aluno 4)

Questão 8

Você gostaria que temas de mecânica quântica tivessem sido discutidos nas suas aulas no Ensino Médio? Porque?

Todos responderam que sim. A maioria citou o fato desse tema chamar muita a atenção das pessoas e também porque mostra o quanto a física ainda está aberta e isso poderia motivar mais alunos a cursar física.

"Sim, mesmo que superficialmente seria uma boa ideia, pois é a área que mais chama a atenção das pessoas, talvez assim as pessoas teriam outra visão da física". (Aluno 7)

"Sim. Você ter o conhecimento de uma área com muitos estudos a seu respeito, que revolucionou a Física em si e tem portas abertas para várias descobertas, pode ser um incentivo a mais ao aluno". (Aluno 13)

"Claro. É uma das áreas da física que mais me chamam a atenção". (Aluno 8)

"Gostaria, até porque essa área desperta curiosidade de muitas pessoas e quem sabe assim, elas não passam a gostar da física". (Aluno 3)

"Sim, pois é uma área que estiga a imaginação do estudantes". (Aluno 12)

O Aluno 15 respondeu que seria bom para poder diferenciar mecânica clássica e quântica.

"Sim, para poder comparar com a mecânica clássica e entender suas diferenças". (Aluno 15)

Já os alunos 6 e 14 responderam que seria bom pois é o que se tem mais próximo da realidade, que este tema seria uma introdução à faculdade.

"Claro, porque no momento é o mais perto que temos da realidade, vamos aprender depois que estiver ultrapassado". (Aluno 14)

"Sim, para ter uma base maior quando entrar na faculdade". (Aluno 6)

4.1.5 Algumas reflexões

Como foi a primeira atividade e encontro com a turma, a ideia era identificar a "bagagem" que eles possuíam de Física Moderna, a partir das discussões sobre algumas das diferenças entre a Física Moderna e a Física Clássica. Pelas discussões e respostas apresentadas acima, percebemos que os alunos possuem uma ideia, mesmo que superficial, do que seja a Física Moderna, que aparece quando eles citaram astronomia ou óptica, por exemplo. Além disso, ao falarmos sobre as concepções da física acerca do mundo pequeno e grande e para baixas e altas velocidades, eles não mostraram total desconhecimento, o que evidencia que já haviam ouvido falar alguma coisa sobre esses temas. Essas informações podem ter sido obtidas através de livros, documentários ou mesmo vídeos. Mas, ao contrário da física do mundo pequeno e grande, os alunos mostraram ter um pouco mais de conhecimento sobre a física à altas velocidades (relatividade).

Pelas respostas dos alunos, nenhum professor chegou a citar essa física do mundo microscópico para eles anteriormente e praticamente, nenhum aluno comentou sobre as atividades.

Comigo ocorre a mesma situação, pois, apesar de ter tido um professor muito bom de física no segundo ano do ensino médio, não tive nenhuma motivação para estudar física, muito menos para ingressar no curso. O máximo de física moderna e contemporânea que ouvi um professor falar, foi ele citar buraco negro. De maneira semelhante, alguns nos ensinam "decorebas" e memorização de fórmulas, o que torna também a disciplina desmotivadora e sem sentido, se tornando apenas uma barreira a ser superada nos vestibulares e processos seletivos. Os alunos citaram também a ausência desses temas na formação dos professores, a carga horária da disciplina, a qual os impossibilita de desenvolverem e usarem tais temas em sala de aula, e o planejamento didático, muitas vezes rígido, que devem seguir. Assim, apesar de não estarem tão familiarizados e por dentro das discussões sobre física moderna, demonstraram possuir alguns conhecimentos acerca da realidade do ensino de física no país e da educação, no geral.

Com relação ao contexto socio-histórico-cultural, percebi que há uma identificação bem consistente por parte dos alunos, de que esse contexto é relevante e está diretamente relacionado aos desenvolvimentos científicos. Porém, ao justificá-lo, percebo que falta um pouco de clareza em suas explicações. Eles apenas citam a importância de se conhecer a sociedade em tal época, suas necessidades e a conexão com o desenvolvimento dos respectivos conhecimentos científicos. Há uma dificuldade por parte deles para falar mais sobre esses temas e, ao longo das discussões e das respectivas respostas, apenas um aluno citou a presença de história da física em seu ensino médio. Assim, aparentemente, essas discussões e reflexões estiveram ausentes para grande parte deles. Não foi diferente da minha experiência enquanto aluno do ensino médio, durante o qual esses momentos não existiram.

Diante disso, creio que os objetivos desse primeiro encontro foram satisfatoriamente atendidos, visto que a ideia era verificar as concepções iniciais dos estudantes com relação as limitações clássicas para a descrição do movimento e da física usada para descrever pequenas partículas. Além disso, a discussão sobre

o contexto histórico, social e cultural, foi muito rica! Os alunos demonstraram ter concepções prévias sobre o tema e de conhecerem a importância desses temas, o que fez com que a aula tivesse um bom rendimento. Mas, senti falta da construção por parte deles, de algum material ou texto dentro desse tema. A aula ficou um pouco densa, com muitos slides e esquemas desenhados, inclusive ao discutir sobre o contexto histórico-sócio-cultural. Uma boa alternativa seria ter proposto uma atividade para que eles produzissem uma síntese sobre o movimento do carro apresentado no vídeo, apontando o uso da física para isso.

Outro ponto importante diz respeito ao questionário. Apesar dele levantar dados relevantes e bem interessantes, algumas questões necessitam de modificação.

Por exemplo, a questão número 2, poderia ser reescrita, acrescentando:

O que você mais ouviu ou aprendeu sobre física no ensino médio?

Poderíamos ter obtido resultados sobre os tópicos mais discutidos no ensino médio por eles e o que seus respectivos professores mais desenvolveram.

A questão número 6 está relacionada ao termo *Mecânica Quântica* pois era um dos objetivos do trabalho, quando ele foi iniciado, que era o desenvolvimento deste tema no ensino de física. Porém, este termo poderia ser modificado para Física Moderna e Contemporânea, seria mais relevante para o trabalho, pois levantaria mais respostas. Pelas análises do questionário, não obtivemos dados relevantes com esse termo o que indica, de certa forma, o desconhecimento dos alunos. E isso também se aplica a questão 8, que faz menção ao mesmo termo.

Por fim, algumas considerações sobre o encontro. O primeiro ponto a destacar é que a presente atividade investiga a percepção dos estudantes, com relação aos limites clássicos de dois fenômenos. E na mesma, conforme discutido nos parágrafos anteriores, identificar e investigar se é possível é necessário os pré-requisitos para discuti-los. Porém, o que ocorreu foi apenas a explanação desses limites e o objetivo só pode ser observado no questionário, posterior à aula. Por-

tanto, se o questionário antecederesse à ela, poderíamos desenvolver e construir uma atividade que se relacionasse de maneira direta com o objetivo do trabalho.

4.2 Atividade 2 – Interação Radiação Matéria: o problema da Radiação do Corpo Negro

Esta atividade tinha como objetivo geral introduzir o problema originado a partir da interação da radiação com a matéria, através da realização de uma atividade experimental, adaptada de (ARRIBAS, 1996), que consistia na observação do processo de aquecimento de latinhas de mesmo tamanho porém de cores diferentes, expostas a uma mesma fonte de calor. A partir desta atividade, queríamos que os alunos investigassem como a energia e as características de uma onda se relacionavam, através de uma investigação de como energia e comprimento de onda (ou frequência) se relacionam. A partir disso, desenvolver com eles uma discussão qualitativa sobre o experimento.

Após a realização da atividade experimental, foi feita uma introdução ao problema da Radiação do Corpo Negro, conectando-o com a atividade experimental, utilizando para isso uma apresentação de slides.

De maneira análoga à atividade 1, a atividade 2 também foi estruturada em três momentos específicos e foi planejada a partir dos seguintes objetivos de ensino:

- Objetivos
 - ★ Evidenciar, através de uma atividade experimental, como se relacionam o aquecimento dos corpos e as cores;
 - ★ Discutir fisicamente o processo de aquecimento dos corpos;
 - ★ Apresentar o problema da interação da radiação com a matéria.

O quadro (4.2) apresenta um detalhamento da atividade 2.

Quadro 4.2 – Detalhamento da atividade 2, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa da atividade.

Momentos	Duração	Descrição
1	20 min	Revisar e discutir os conceitos apresentados na atividade anterior, chamando a atenção para alguns deles; Através de uma atividade experimental, discutir a relação entre o aquecimento e as diversas cores.
2	50 min	Discutir o processo de aquecimento dos corpos, ressaltando as diferentes estruturas microscópicas presentes na matéria e como isso influencia o aquecimento dos diversos materiais; Introduzir o problema da interação entre a radiação e a matéria; Caracterizar e definir um corpo negro.
3	30 min	Avaliar os conhecimentos desenvolvidos ao longo da atividade.

Fonte: Autor (2019).

4.2.1 Momento 1

Inicialmente, fizemos uma revisão da discussão realizada na atividade anterior, com foco principalmente na questão de como a física cria modelos para encontrar respostas sobre fenômenos presentes na natureza.

Após essa breve discussão, os estudantes se separaram em grupos, e cada grupo ficou responsável pela observação do aquecimento de uma latinha. Eles deveriam analisar o que ocorre no experimento, anotar as observações e redigir as respostas para algumas questões, apresentadas no material. A partir do que observassem, deveriam desenvolver uma possível explicação. Foi dado um tempo para a realização das discussões e elaboração de um texto pelos grupos, no qual eles deveriam apresentar suas respectivas respostas.

A atividade experimental consistia na observação do aumento da temperatura para latinhas do mesmo tamanho, porém pintadas em cores diferentes, através do uso de termômetros de álcool colocados dentro de cada uma delas. A fig.(4.1) apresenta o aparato experimental utilizado.

No centro é colocada a fonte de calor, que no nosso caso era um fogareiro, feito a partir da retirada do fundo de uma lata de alumínio. Nela, inseri uma

Figura 4.1 – Disposição das latas e da fonte de calor para a realização do experimento de aquecimento das latinhas



Fonte: Autor (2019).

quantidade de álcool em gel como combustível. Todo o aparato está apoiado sobre uma camada de papelão. As latinhas são postas ao redor do fogareiro, de maneira que estejam equidistantes do mesmo. Isso foi feito com a utilização de uma régua, distanciando-as da fonte cerca de 15cm .

Durante o desenvolvimento do experimento “*Observando o aquecimento das latinhas*”, inicialmente, coloquei o aparato sobre uma mesa e chamei toda a turma para visualizar o arranjo experimental, aproveitando para explicar os objetivos e os procedimentos necessários para alcançá-los. Solicitei à turma que se dividisse em oito grupos, um para cada lata do aparato. Assim, cada grupo ficou responsável pela leitura de uma latinha e o professor Antônio Marcelo, ficou visualizando a leitura de um dos termômetros, para completar. Transcrevi a tabela do formulário para o quadro modificando-a, de forma que, ao término do experimento, tivéssemos as temperaturas de todas as latinhas, ao longo do tempo, o que tornaria a discussão dos resultados mais fácil.

Para dar início, solicitei à um aluno que cronometrasse o tempo e assim, acendi o fogareiro. Cada grupo ficou atento ao seu termômetro e foram anotando as temperaturas. Posterior à esse momento, os grupos foram passando os dados coletados e eu, transcrevendo para a tabela no quadro. Com os dados postos, de-

tectamos um problema: as temperaturas não se diferenciaram de maneira razoável. Isso contrariava às minhas expectativas e a dos alunos, visto que o esperado era que as latinhas de cores mais escuras esquentassem mais que as latinhas de cores mais claras.

Como isso não estava previsto no meu planejamento, pensei em aproveitar a leitura das temperaturas obtidas no experimento e dar continuidade a aula, porém, modificando o desenvolvimento e mantendo os objetivos propostos. Assim, aproveitei e questionei a turma o motivo pelo qual o experimento não "funcionou". Quase que de forma unânime, todos responderam que foi a própria montagem e os materiais usados no experimento. Talvez uma fonte de calor uniforme, um ambiente isolado ou uma distância uniforme entre a fonte de calor e as latinhas, resolveria tal problema. Houve também um comentário sobre a confecção das latinhas, pois, afinal, o logo da marca e as suas respectivas cores, ainda estavam visíveis e a pintura foi feita por cima destas. Será que isso não havia interferido nos resultados? Houve também o questionamento sobre o tamanho das latinhas e as distâncias que uma tinha das outras e da fonte de calor. Não eram todas do mesmo tamanho, inclusive a que estava pintada com tinta preta era menor que as demais. Um outro problema também é que as distâncias foram todas medidas de forma aproximada, sem usarmos uma régua ou trena.

4.2.2 Momento 2

Após a realização da atividade experimental, foi feita uma discussão sobre como conseguimos analisar e discutir dados obtidos experimentalmente que envolvem um fenômeno físico qualquer. Nesse ponto, foi dado enfoque para o que a física lecionada no ensino médio enfatizava (grandezas, fórmulas, conceitos, entre outros). Com essa ideia em mente, os grupos discutiram sobre o processo de aquecimento dos corpos, tentando conectar este processo com a estrutura da matéria e a influência dessa estrutura no aquecimento dos corpos.

Foi enfatizada a discussão sobre a transferência de energia dos corpos com o ambiente ou com um outro corpo, lembrando de algumas situações em que há a conservação de energia. Após as discussões dos grupos, retornamos ao problema do carro, apresentado na atividade 1, discutindo como a energia se comporta durante o seu movimento. Foi indagado aos estudantes se há ou não conservação de energia neste caso. A discussão foi finalizada falando sobre o processo de aquecimento de um metal, e de como, ao ser aquecido, ele muda de cor (ou de luminosidade), relacionando o aumento da temperatura com a radiação térmica absorvida e emitida por ele, bem como com a frequência e a intensidade.

Dei sequência a discussão perguntando aos alunos sobre as grandezas físicas envolvidas no aquecimento dos corpos. Sem nenhum problema, os estudantes responderam: temperatura e quantidade de calor. Na verdade, citaram apenas essas duas grandezas. A ideia de calor se propagando como uma onda não apareceu em nenhuma fala, o que de certa forma, era esperado.

No slide utilizado para conduzir esta discussão havia a figura de uma barra metálica em uma temperatura elevada, dando a entender que ela possuía uma luminescência própria, um certo brilho. Como, na discussão anterior, havia percebido que eles não identificavam calor como uma forma de energia se propagando, dei o exemplo da transferência de calor entre um corpo e o ambiente. Quando existe uma diferença de temperatura entre o corpo e o ambiente, ocorre uma transferência de calor entre eles. Questionei a eles se eles visualizavam esse calor sendo transmitido e também se eles conseguiam explicar como ocorre essa transferência de calor. Além deles não identificarem a forma com que o calor se propaga, eles também não associaram calor como energia. Esse ponto é bastante intrigante, visto que o conceito de calor é um tópico presente em sala de aula do Ensino Médio.

Na sequência, apresentei o espectro eletromagnético no slide, enfatizando que ele é um “mapa” das ondas eletromagnéticas presentes em nosso dia a dia. Iniciei a discussão com eles, destacando as grandezas comprimento de onda e

frequência. Desenvolvi com eles esses conceitos, utilizando a lousa como apoio e mostrando como elas se relacionam. Dentro dessa discussão, mostrei a eles também as cores primárias e suas respectivas frequências e levantei o questionamento de como podemos enxergar alguns objetos à nossa volta e outros não. Voltei ao problema do corpo metálico aquecido, onde visualizamos esse “brilho”, que eu defini como intensidade luminosa. Previ que eles desconheciam essa grandeza, por isso fui muito minucioso em explicar que intensidade, na física, é uma relação entre potência e área. A turma em si, permaneceu em silêncio observando o desenvolvimento da equação.

Isso já era esperado, visto que eles não viram esse conceito no ensino médio. Voltando a definição de intensidade, foquei em falar sobre potência e que a mesma é uma relação entre energia e intervalo de tempo. A partir dessas discussões, apresentei a eles a eq.(4.1).

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{A} \\ I &= \frac{E}{At} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Na eq.(4.1) temos que P é a potência, E é a energia, A é a área e t é o intervalo de tempo.

Questionei a turma se havia alguma relação entre essa equação e o "calor". A turma não se manifestou e, rapidamente, pensei em como relacionar essa equação com o conceito de calor. Perguntei à turma o que é calor e alguns alunos responderam que calor é uma propagação de energia. Como a equação estava exposta no quadro, apontei para o E presente nela e indaguei se ele não poderia ser essa energia e, se não, porque não. Os alunos discutiram entre si e comigo, afirmando que o calor é uma propagação de energia e então, ela se encaixa sim

nessa equação. Portanto, os questionei se podemos considerar o calor uma onda e a maioria disse que sim. E o famoso “*hmmmmmmmm. . .*” se espalhou pela turma.

Logo, se visualizamos esse “brilho”, quer dizer que temos uma radiação, que possui uma frequência dentro do intervalo do visível. E continuei apresentando a eles a seguinte questão: se a barra esfriasse, ela pararia de brilhar e não visualizaríamos mais essa radiação sendo emitida. Dentro dessa discussão, eles identificaram que mesmo o corpo metálico, não emitindo brilho, ainda emitiria uma radiação, porém com uma frequência (ou comprimento de onda) fora do intervalo do visível, como haviam visto na discussão sobre o espectro eletromagnético.

Dei continuidade a discussão, aproveitando para indagar o que aconteceria se esquentássemos ainda mais esse corpo, se ele brilharia mais. Eles responderam que, se isso ocorrer a intensidade será muito maior, haverá mais propagação de energia.

Portanto, se temos uma intensidade maior, há uma transmissão maior de energia, que no caso é a propagação de calor. Questionei a turma se há uma forma de relacionarmos essa energia com a frequência ou com o comprimento de onda, pois se conseguimos visualizar a radiação, que é uma forma de propagação de energia, e se ela possui uma determinada frequência, tem de haver uma relação entre eles. Afirmi que quando aumentamos a frequência, a intensidade aumenta! Nesse momento houve um silêncio na sala.

Na minha avaliação, essa parte final da aula ficou um pouco massante. Além disso, tenho que considerar se de fato os estudantes conseguiram visualizar o problema dessa relação, entre energia e frequência. Qual é a importância dessa relação? Não ficou claro para mim se eles conseguiram perceber isso. De qualquer forma, a aula se encerrou com esse questionamento, como relacionar energia com frequência ou comprimento de onda, sendo proposto a eles.

Essa discussão era necessária para construir a ideia de que o conhecimento disponível na Física Clássica não respondia ao fato de não termos uma relação

entre a energia propagada pelo calor da barra e a frequência da radiação emitida por ela. Isso foi usado como um fechamento, para relacionar com a próxima aula, visto que precisamos de algo mais para responder essa pergunta.

4.2.3 Momento 3

Foi distribuído à turma um questionário sobre os conceitos discutidos em sala para coleta de dados, cujas respostas serão discutidas a seguir.

4.2.4 Análise das Respostas ao Questionário

O questionário da atividade 2 é composto de duas partes, sendo a primeira referente à atividade experimental com 5 questões, e a segunda parte referente aos conhecimentos e concepções dos estudantes sobre conceitos de física ondulatória, contendo 9 questões. O questionário foi respondido em duplas, totalizando 7 duplas e um aluno que respondeu individualmente, totalizando 15 estudantes.

A seguir são apresentadas as questões e algumas das respostas dos estudantes que chamaram a atenção, porém da parte I do questionário, discutiremos apenas as questões 2 e 3, pois a atividade experimental não ocorreu da maneira planejada, gerando controvérsias e possivelmente, dados incorretos. As duas questões foram escolhidas pois apresentam um caráter mais de avaliação dos pré-requisitos que eles trazem do ensino médio. Uma breve discussão segue cada questão.

Parte I – Registros Atividade Experimental

Questão 2: Nas medidas feitas pelo grupo, houve aumento da indicação do termômetro? O que isso representa?

Das sete duplas presentes no dia, duas duplas citaram a transferência de calor como sendo a responsável pela mudança da temperatura.

“Houve um aumento na temperatura de indicação do termômetro. Que o objeto recebeu energia”. (Aluno 13 e Aluno 14)

“Houve aumento. A lata recebeu calor da fonte de energia, aumentando sua temperatura”. (Aluno 9 e Aluno 12)

Enquanto que quatro duplas citaram a radiação.

“Sim. Isso representa que a lata recebeu radiação”. (Aluno 11 e Aluno 16)

“Sim, que há troca de calor da chama para a latinha através da radiação”. (Aluno 3 e Aluno 8)

Portanto, vemos que eles identificam a transmissão de calor por radiação porém, a ideia do calor ser uma energia, não aparece explicitamente na fala das duplas.

Questão 3: O que foi transmitido à lata para que a indicação do termômetro se modificasse?

Aqui, podemos dividir as respostas em três grupos: calor, energia térmica e radiação. Uma dupla, respondeu que o que foi transmitido a lata para que sua temperatura fosse modificada foi energia térmica.

“Energia Térmica”. (Aluno 3 e Aluno 8)

Uma dupla cita o calor:

“Calor”. (Aluno 2 e Aluno 7)

Quatro duplas falam da radiação, responsável pela modificação da temperatura:

“Calor por meio de radiação”. (Aluno 11 e Aluno 15)

“Ondas eletromagnéticas, radiação”. (Aluno 13 e Aluno 14)

“Calor em forma de radiação”. (Aluno 9 e Aluno 12)

Uma outra dupla, cita os três juntamente:

“Radiação, calor e energia”. (Aluno 11 e Aluno 16)

Portanto, vemos que os estudantes identificam as principais grandezas presentes no aquecimento da latinha, o que é bem satisfatório. Pois assim, podemos fazer uma discussão mais ampla sobre a relação entre elas e ondulatória.

Parte II – Questionário Aula 2

1. Calor e temperatura são a mesma coisa? Se a resposta for negativa, explique a diferença.

A resposta foi unânime: não. E todas as duplas identificaram a temperatura como um “grau” de agitação das moléculas e o calor como uma energia em transição. Seguem algumas respostas:

“Não, temperatura é o grau de agitação das moléculas e calor é uma energia interna em trânsito”. (Aluno 3 e Aluno 8)

“Não, Temperatura é o grau de agitação das moléculas. Calor é a energia em transito entre dois corpos com temperaturas diferentes”. (Aluno 2 e Aluno 7)

“Não. Temperatura é o grau de agitação das moléculas e o calor é o fluxo de energia térmica”. (Aluno 11 e Aluno 15)

2. Como os corpos se aquecem?

Nessa questão, houve respostas distintas entre as duplas. Assim, as separei em 3 grupos:

- **Agitação das Moléculas:** das 7 duplas que responderam, apenas uma citou a agitação das moléculas como responsável pelo aquecimento dos corpos

"Através da agitação das moléculas devido ao fluxo de calor". (Aluno 11 e Aluno 15)

- **Propagação de Calor:** das 7 duplas, 3 citaram as formas de propagação de calor como responsáveis pelo aquecimento dos corpos. Eis suas respostas:

“radiação, condução, convecção”. (Aluno 13 e Aluno 14)

“Pelas 3 formas de propagação de calor”. (Aluno 3 e Aluno 8)

- **Equilíbrio Térmico:** das 7 duplas, 2 citaram a necessidade dos corpos de obterem um equilíbrio térmico, como responsável pelo aquecimento deles.

“Os corpos ‘trocam’ energia entre si, um corpo pode receber energia do outro, tendendo a entrar em equilíbrio”. (Aluno 9 e Aluno 12)

“O calor (palavra desconhecida) é transferido entre corpos quando suas temperaturas são diferentes, chegando a um equilíbrio térmico”. (Aluno 1)

Pelas respostas, suponho que eles identificam o calor como um ente físico que se desloca (de um corpo para o outro). A dupla Alunos 10-16 usa o termo propagação de temperatura, mostrando claramente a confusão comum entre os estudantes, sobre os conceitos de calor e temperatura.

3. O que é radiação?

As respostas das duplas não se diferenciaram muito, mas foi possível dividir as respostas em dois grupos, sendo eles:

- **Ondas:** Das 7 duplas, 2 duplas responderam que uma radiação é uma onda.

“Ondas que se propagam conduzindo energia em forma de calor”. (Aluno 11 e Aluno 15)

“Onda Eletromagnética”. (Aluno 13 e Aluno 14)

- **Propagação de Energia:** as 5 duplas restantes, entendem que a radiação é uma forma de propagação de energia. Dentro destas, 3 duplas responderam que essa propagação de energia, ocorre por meio de ondas.

“é a propagação de energia por ondas eletromagnética”.

(Aluno 1)

“Um tipo de propagação de calor que não necessita de meios materiais para se propagar e se dá através de ondas eletromagnéticas”. (Aluno 3 e Aluno 8)

“Emissão de energia por meio de ondas”. (Aluno 2 e Aluno 7)

As 2 duplas restantes, responderam:

“É a propagação de energia”. (Aluno 9 e Aluno 12)

“Radiação é a propagação de energia de um ponto a outro”.

(Aluno 10 e Aluno 16)

As respostas indicam uma compreensão inicial sobre o que é a radiação.

4. Um corpo mais quente que o meio que o cerca irá esfriar? Como?

De forma unânime, todos responderam que sim. As diferenças estão na explicação do porquê isso ocorre. Entre elas, foi possível identificar dois grupos de respostas diferentes: Propagação de Calor e Equilíbrio Térmico. Das 7 duplas, 2 explicaram que isso ocorre devido à propagação, 4 duplas citaram o equilíbrio térmico como responsável para tal e uma dupla citou

apenas a liberação de calor para o meio. Analisando as respostas, no geral, vemos que eles identificam o calor como uma grandeza que se desloca de um corpo para outro ou se dissipa pelo ambiente.

Seguem as duas respostas do primeiro grupo – propagação de calor:

“Sim, por radiação”. (Aluno 12 e 14)

“Sim, por equilíbrio térmico. Um corpo com maior temperatura tende a perder calor para um corpo (ou meio) de menor temperatura”. (Aluno 3 e 8)

Do segundo grupo – equilíbrio térmico:

“Sim, pois a energia do corpo irá se dissipar, porque esta em contato com o meio externo, tendendo a esfriar e entrar em equilíbrio”. (Aluno 9 e 12)

“Sim. Ele vai perder calor para o meio até entrar em equilíbrio térmico”. (Aluno 11 e 15)

“Sim. Um corpo quente perto de outro frio tende a ter dissipação de calor e ter um equilíbrio”. (Aluno 10 e 16)

E a resposta que não se encaixou em nenhum dos grupos é:

“Sim, liberando calor para o meio”. (Aluno 2 e 7)

5. Explique como conseguimos observar os corpos a nossa volta e o que é necessário para enxergar.

Nessa questão, as respostas deixam claro que os corpos necessitam de uma fonte de luz para serem observados, e dentro dessas respostas, todas as duplas citam a reflexão da luz como justificativa para observarmos os corpos a nossa volta. Houve duas respostas de destaque, em que uma dupla fala sobre a reflexão da luz como responsável pela visão de um corpo, porém,

ressaltando que uma parte dela é absorvida, e outra dupla afirmando a mesma coisa, porém, ressaltando que o objeto absorve a luz e reflete as cores:

“Quando um corpo entra em contato com a luz, ele absorve uma parte e reflete a outra”. (Aluno 13 e 14)

“Pela reflexão da luz. A luz atinge o objeto, ele absorve e reflete as cores”. (Aluno 3 e 8)

As demais duplas mencionaram apenas a reflexão da luz como justificativa:

”A luz atinge no objeto e reflete para nossos olhos”. (Aluno 2 e 7)

“Enxergamos por causa da capacidade que cada corpo tem de refletir a luz que é capitada por nossos olhos”. (Aluno 11 e 15)

6. Um corpo possui luminosidade própria? Explique e dê exemplos.

Na presente questão, todas as duplas identificaram uma estrela ou o Sol como corpos que possuem luminosidade própria. Creio que pela apresentação e discussão que tivemos momentos atrás, eles citaram esses corpos influenciados por essa discussão. Talvez a questão não estivesse clara o suficiente. Motivos para essa falta de diversidade nas respostas podem ser atribuídos ao questionário estar longo e massante ou a pergunta estar mal formulada para o objetivo pretendido.

Poucas duplas explicaram o motivo de tais corpos terem luminosidade própria. Das 7 duplas, apenas 3 justificaram suas respostas.

“Sim. Exemplo: estrelas, pois são fontes de energia”. (Aluno 3 e 8)

“Sim, ele sendo a fonte de energia, estrelas”. (Aluno 9 e 12)

“Sim. Um corpo que emite radiação emite luz”. (Aluno 10 e 16)

7. Você sabe o que é o espectro eletromagnético? Explique.

Nessa questão, não há uma uniformidade das respostas e nem um padrão entre elas. Alguns alunos explicam como sendo um gráfico, um intervalo de frequência, estudo da frequência de ondas ou da ondulatória.

“É o estudo da luz em comprimento de ondas”. (Aluno 2 e 7)

“É um gráfico que relaciona a frequência e o comprimento de onda com os tipos de ondas eletromagnéticas”. (Aluno 13 e 14)

“É o intervalo completo de todas as possíveis frequências da radiação eletromagnética”. (Aluno 10 e 16)

8. Explique o porquê de observarmos diferentes cores.

Todas as respostas a essa questão se dirigem ao fato das cores terem comprimento de onda e frequências diferentes. Sendo assim, percebemos que eles identificam as cores como uma característica das ondas, que possuem comprimentos de onda e frequências diversas.

“A luz entra em nossos olhos em forma de ondas, com diferentes comprimentos, formando as cores”. (Aluno 10 e 16)

“Porque elas refletem frequência diferentes”. (Aluno 3 e 8)

“Porque elas refletem em frequência diferentes”. (Aluno 1)

9. Na sua opinião, porque se estuda a luz?

Nessa questão, todos citaram a compreensão dos fenômenos ópticos, da luz e das cores ou para descobrir outras formas da matéria. Apenas uma dupla citou esse estudo para se obter uma fonte de energia inesgotável. Portanto, vemos que os estudantes entendem a importância do estudo da luz e sua implicação na sociedade e também os fenômenos que ela gera.

“Porque precisamos entender os fenômenos ópticos”. (Aluno 1)

“Para entender como funciona as cores e suas características”. (Aluno 2 e 7)

“Ele influencia nos fenômenos da natureza”. (Aluno 13 e 14)

4.2.5 Algumas Reflexões

A presente aula foi o segundo encontro com a turma. E foi uma aula posterior às discussões sobre os limites entre a física clássica e a física moderna e contemporânea. Dessa forma, essa aula foi pensada de maneira a introduzir o primeiro problema que a física clássica encontrou, que foi a relação entre radiação e matéria. Para tal, usamos o experimento do aquecimento das latinhas para introduzir o conceito de intensidade e, a partir desse conceito, discutir os dados experimentais. A intenção era instigar os alunos a refletirem sobre a relação entre calor e energia.

Inicialmente, podemos começar pela reflexão a partir do próprio experimento. Pelas nossas concepções iniciais, podemos dizer que as latinhas de cores mais escuras, ficariam mais quentes, quando expostas a uma fonte de calor, com o passar do tempo, do que as latinhas com cores mais claras. E, portanto, na atividade experimental, o esperado era que isso ocorresse. Porém, os dados coletados mostraram que isso não é totalmente verdade, sendo que a mudança de temperatura para todas as latas foi quase igual. Como já mencionado, há a necessidade de se refazer tal atividade para verificar sua funcionalidade e se as nossas

expectativas iniciais se confirmam. Nessa reanálise, a partir das nossas discussões, devemos montar o aparato de forma que possamos corrigir os problemas experimentais identificados, que foram: a fonte de calor deve ser uniforme; as latinhas devem ser idênticas, sem rótulos; as latinhas devem ser posicionadas equidistantes da fonte de calor e, por último, devemos usar um número menor de latinhas.

Começemos a discutir pela fonte de calor. O fogareiro que foi usado não pode ser considerado uma fonte de calor uniforme, pois temos que a chama promovida pelo álcool em gel é variável, sofrendo interferência de deslocamento de ar e da temperatura ambiente. A melhor sugestão é usarmos uma lâmpada incandescente no centro, pois o calor será irradiado radialmente de forma uniforme, além de não correr o risco com queimaduras ou acidentes.

O outro ponto, que é o posicionamento das latinhas em relação à fonte de calor. Na atividade esse posicionamento foi feito a olho nu, com o auxílio de uma régua comum. Elas poderiam ter sido fixadas de uma maneira mais cuidadosa. As latinhas devem ser de tamanhos idênticos e sem rótulos ou cores. Caso não se encontrem latinhas com essas características, deve-se raspá-las com um pedaço de bombril ou com uma lixa. Para pintá-las, foi usada tinta guache e um pincel convencional. Isso pode acarretar em problemas também, pois as camadas de pintura, se não forem feitas de maneira uniforme, podem interferir na leitura dos dados de temperatura. Assim, a sugestão é que essa pintura seja feita com tinta spray e que o número de latinhas, bem como as cores, sejam reduzidas para cinco, de forma que peguemos os extremos, tanto da parte do espectro eletromagnético: roxo, verde e vermelho, como do branco e do preto. Sobre as cores do espectro, foi sugestão do professor Antônio Marcelo que se use apenas essas três, as quais se encontram nos extremos do espectro visível: violeta e vermelho nas extremidades e o verde no meio. Sobre a montagem, o correto a se fazer é, antes de se instalar a fonte de calor (no caso, a lâmpada) e fixar as latinhas, fazer as medições na base (que pode ser num pedaço de papelão ou madeira) com um lápis. De forma a

manter essa uniformidade, a disposição das latinhas e da fonte devem ser tal, que formem um pentágono perfeito⁴, no qual as latinhas serão os vértices e a fonte de calor o centro do pentágono. Mas aqui, atentar-se ao fato que a latinha possui formato geométrico cilíndrico, então é preciso medir o raio de sua base e desenhar o círculo referente às bases das latinhas, e assim, montar o experimento. Com isso feito, creio que seja possível analisar a veracidade do experimento e ter uma leitura mais precisa das temperaturas obtidas.

Com relação às discussões sobre intensidade de uma onda, percebi que os alunos ainda não haviam estudado tal tema ou mesmo que nunca tiveram contato com ele no ensino médio. Percebi também que tiveram dificuldades em identificar o calor como uma onda, uma propagação de energia, mesmo que saibam que o calor é uma energia em trânsito, como muitos me responderam em sala de aula. Senti que faltou uma conexão mais palpável entre o experimento e esse novo conceito, visto que apenas os questioneei e os fiz chegar a ele. Mas considero que o desenvolvimento da relação entre radiação e energia, foi satisfatória, pois os alunos identificaram a problemática. Sendo assim, a ligação entre essa e a próxima aula não deve ser um grande problema.

Na análise dos questionários, dá para perceber claramente, diante da primeira parte, que eles identificam que o calor se propaga.. Diante disso, temos uma problemática interessante que é a não identificação de calor como uma onda, o que anda na contramão da definição dada por eles, de que calor é uma propagação de energia.

Ainda relacionado a isso, eles sabem também que temperatura e calor são entidades diferentes e, quase que unanimemente, todos identificam a temperatura como agitação de moléculas e calor como uma forma de energia e que também se desloca (de um corpo para o outro).

⁴ Para mais detalhes como desenhar um pentágono, acesse: <<https://docente.ifrn.edu.br/karisapinheiro/disciplinas/desenho-tecnico/aula-08-pentagono-hexagono-heptagono-octogono>>

Por fim, percebi que eles identificam de maneira razoável as grandezas comprimento de onda e frequência no espectro eletromagnético e que, a partir delas, você pode fazer uma relação com energia: uma onda com maior frequência, gera maior energia. E isso vale o contrário para a relação de comprimento de onda e energia, no qual quanto maior o comprimento de onda, menor a energia. Assim, vemos que eles identificam as grandezas como inversamente proporcionais. Além disso, é um resultado satisfatório para as futuras discussões e de que o tema, no caso os pré-requisitos, estão contemplados.

4.3 Atividade 3 – Constante de Planck e o problema da Radiação do Corpo Negro

Essa atividade teve como objetivo geral apresentar a constante de Planck, a partir da discussão do problema envolvendo a interação Radiação-Matéria, iniciada na atividade anterior, com o experimento das latinhas. Para isso, realizamos uma breve discussão sobre a atividade 2, destacando os três pontos principais: as definições e diferenças entre Calor e Temperatura; as grandezas comprimento de onda, frequência e energia e, por fim, a natureza da radiação. Damos ênfase a relação das grandezas que caracterizam a radiação com a definição de calor, de forma que eles lembrassem que calor é uma forma de energia. Portanto, queríamos nessa atividade fazer com que eles discutissem qual é a relação da energia com as grandezas da ondulatória – frequência e comprimento de onda.

Foram utilizados slides, discussões dialogadas e um simulador computacional.

De maneira análoga as anteriores, esta atividade está estruturada em três momentos específicos e foi planejada a partir dos seguintes objetivos de ensino:

- **Objetivos**

- ★ Introduzir e discutir o problema da Radiação do Corpo Negro;

★ Desenvolver a discussão através da análise de um gráfico $I \times \lambda$ usando o simulador PhET⁵.

O quadro (4.3) apresenta um detalhamento da atividade 3.

Quadro 4.3 – Síntese da atividade 3, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa.

Momentos	Duração	Descrição
1	30 min	Discutir os conceitos apresentados na atividade anterior, chamando a atenção para aqueles mais importantes para a presente aula; Introduzir o problema da Radiação do Corpo Negro, a partir de uma problematização.
2	40 min	Desenvolver o problema proposto através da análise de um gráfico $I \times \lambda$ usando o PhET; Discutir e analisar os resultados encontrados.
3	30 min	Avaliar os conhecimentos desenvolvidos ao longo da atividade.

4.3.1 Momento 1

Nesse primeiro momento, foi feita uma revisão das principais discussões realizadas na atividade anterior, ressaltando os conceitos de temperatura e calor, bem como de radiação, usando os resultados da atividade experimental. Feito isso, apresentamos aos estudantes uma problematização sobre o que acontece quando se aquece uma chapa de metal constantemente.

Essa problematização foi feita através da exibição de um vídeo⁶ que mostra como regular um maçarico oxi acetileno. Esse vídeo foi escolhido, pois ele mostra as diferentes colorações que a chama apresenta ao se regular a temperatura do maçarico⁷.

⁵ The Blackbody Spectrum. Disponível em: <<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/blackbody-spectrum>>. Acesso em 01 de agosto de 2018.

⁶ CORREA, E. *Como regular maçarico oxi acetileno*. 2014. (3m53s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RiGT94Z4lus>>. Acesso em: 08out.2018;>

⁷ Na escolha desse vídeo tivemos que ter um certo cuidado, pois as diferentes colorações da chama não são devidas unicamente aos diferentes comprimentos de onda e energias provenientes da mesma, mas também ao comburente presente no maçarico. Portanto, isso devia e deve ficar claro na explicação desse exemplo e em exemplos semelhantes,

Após a exibição do vídeo, a discussão ficou em torno da mudança da coloração da chama. Muitos alunos relacionaram essa mudança de cor com a diferença de temperatura ao longo da chama. Aproveitei para citar outros exemplos, presentes no dia a dia, de chamas que apresentam colorações variadas ao longo de seu comprimento, como a vela e o isqueiro. Tendo o cuidado de não chegar de forma direta no objetivo e de não desvincular as respostas deles com a atividade, dei um enfoque maior ao que eles disseram, sobre a mudança de temperatura, e questionei sobre o calor, pois eles ainda não haviam mencionado nada sobre isso. E, unanimemente, todos responderam que o calor proveniente da chama é diferente ao longo de uma chama. Retornando a relação entre calor e energia, na equação de intensidade, a turma em si demonstrou ter reconhecido essa relação.

Para tentar relacionar essa discussão com tudo que já vinha sendo discutido, peguei novamente o exemplo da vela e tentei, de certa forma, relacionar a coloração da chama com o espectro eletromagnético, de forma que eles comessem a ter uma breve noção de que aquele calor que nós sentimos é uma propagação de energia e que ela possui uma frequência. A vela apresenta uma coloração azulada bem no início da sua chama, quase que saindo do pavio, e muitos comentaram que próximo a cor azul, é onde há uma frequência maior⁸, dentro do espectro visível. A partir da afirmativa deles de que a frequência seria maior, lancei a pergunta: “Teremos uma temperatura maior, então?”. A maioria respondeu que sim e, a partir desse ponto, ficou mais fácil discutir a relação entre temperatura e frequência, pois se temos a leitura de uma temperatura mais alta, a frequência será maior. Dei-

tais como: isqueiros, velas, lareiras, fornos, entre outros. Uma boa referência para uma leitura breve se encontra no seguinte link: ARAÚJO, T. *Por que o fogo pode ter várias cores diferentes?*, Revista Super Interessante, 2018. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/por-que-o-fogo-pode-ter-varias-cores-diferentes/>>. Acesso em: 08 out. 2018.

⁸ Nesse ponto, lembrei do exemplo que o professor Antônio Marcelo deu em sala de aula da corda para eles conseguirem visualizar a relação entre temperatura e frequência, sendo que, quanto maior a agitação que aplicamos à corda, mais energia gastamos, o que nos faz transpirar e cansar. Ou seja, o primeiro se relaciona a frequência e o segundo à temperatura, visto que transpiramos e suamos.

xei claro aqui que frequência e comprimento de onda são grandezas inversamente proporcionais. Quando uma decresce, a outra cresce.

Solicitei aos grupos que criassem um gráfico representando a intensidade em função da frequência, a partir dessa discussão e de seus conhecimentos anteriores.

4.3.2 Momento 2

Cada grupo apresentou o seu gráfico, comentando e justificando o resultado. Feito isso, apresentei a definição de corpo negro com a discussão de alguns exemplos, inclusive a de um objeto que possui uma cavidade interna, isto é, que é oco, ligada ao exterior através de um pequeno orifício, conforme mostra a fig.(2.5).

Observando a fig.(2.5), nota-se que a radiação que incide no orifício, é totalmente absorvida após várias reflexões na superfície da cavidade interna. Sendo assim, esse orifício comporta-se como um corpo negro, absorvendo toda a radiação incidente. Aqui a ideia era realizar uma conexão com a atividade experimental das latinhas, porém como o experimento não apresentou resultados satisfatórios, isso não foi possível.

Após apresentar a definição de corpo negro, solicitei que eles respondessem se o gráfico $I \times \lambda$ para este corpo apresentaria similaridades com aquele desenvolvido por eles para o caso inicial. A partir dessa discussão, apresentei de forma expositiva, a teoria que Lord Rayleigh⁹ tentou criar para produzir uma explicação para estes tipos de fenômenos. Apresentei à eles que ele era um físico que estudava fenômenos ondulatórios e que recebeu o nobel em 1904 por suas pesquisas sobre densidades de gases e pela descoberta do gás de argônio. E que também desenvolveu uma teoria descrevendo a radiação espectral eletromagnética para todos os comprimentos de onda, desde um corpo negro até um corpo com uma temperatura qualquer.

⁹ Conforme apresentado na seção (2.4).

Rayleigh mostrou que a distribuição espectral de um corpo negro deveria ter a forma:

$$I = \frac{2\pi cKT}{\lambda^4} \quad (4.2)$$

Na eq.(4.2), temos que:

c – Velocidade da luz;

T – Temperatura, dada em Kelvin (K);

K – Constante de Boltzmann;

λ – Comprimento de onda, dado em metros (m).

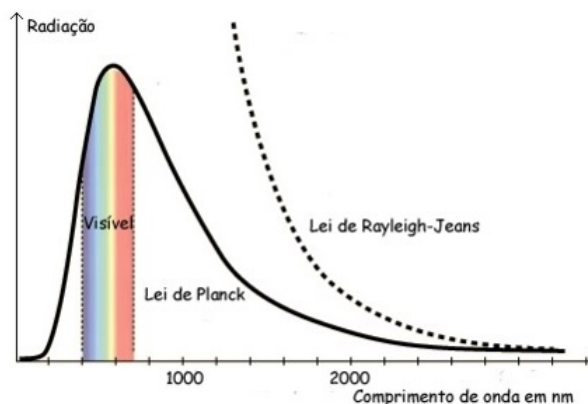
A eq.(4.2), proposta por Rayleigh, mostra que a intensidade emitida pelo corpo varia com o inverso da quarta potência do comprimento de onda. Isso significa que para um comprimento de onda muito pequeno, a intensidade cresce infinitamente.

A fig.(4.2) mostra a previsão teórica (linha pontilhada) e o resultado experimental (linha cheia) para um certa temperatura. Percebemos que a previsão teórica não condiz com os resultados experimentais, visto que os dados experimentais crescem exponencialmente até um certo ponto e decrescem novamente, o que não ocorre com a previsão teórica. Esse problema ficou conhecido como o problema do Corpo Negro.

Após esta pequena discussão teórica, apresentei, usando o simulador PhET¹⁰, os resultados experimentais, mostrando aos alunos que o previsto pela física clássica não condizia com os dados coletados experimentalmente, gerando o que ficou conhecido como Catástrofe do Ultravioleta.

¹⁰ Blackbody Spectrum. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/blackbody-spectrum>. Acesso em 22 de ago. de 2018

Figura 4.2 – Lei de Rayleigh-Jeans comparada com os dados experimentais para a emissão de um corpo aquecido a uma certa temperatura.



Fonte: Corpo Negro. Disponível em:

<https://lief.if.ufrgs.br/pub/cref/n25_Alvarenga/corpo_negro.htm>. Acesso em 22 de ago. de 2018

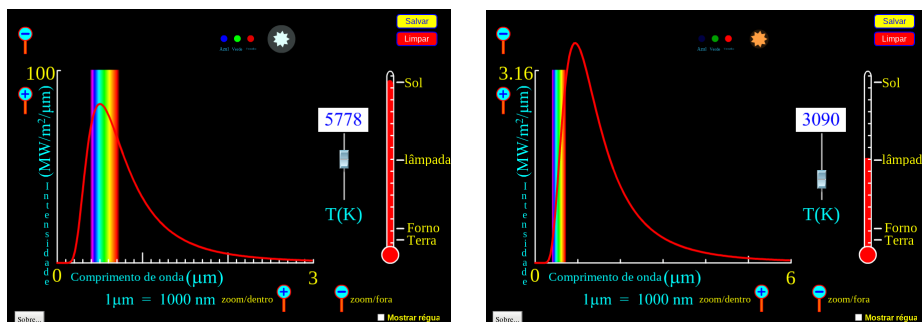
As figuras (4.3) e (4.4) mostram dados obtidos a partir do simulador PhET para o Corpo Negro, utilizando-se diferentes temperaturas. Na fig.(4.3) percebemos que a região visível do espectro eletromagnético está presente, abaixo das curvas. No entanto, na fig.(4.4) o intervalo de comprimentos de onda do espectro visível ao olho humano, está fora da faixa em que a intensidade é significativa.

Para tentar solucionar o problema do Corpo Negro, em 1900, numa reunião da Sociedade Alemã de Física, Max Planck apresentou uma possível solução para os dados experimentais, a qual se ajusta perfeitamente a eles. Segundo ele, a solução foi desenvolvida em um “ato de desespero” no qual ele partiu dos dados experimentais para chegar a função.

Nesse ponto, comentei com que eles que mal sabia ele, que a constante utilizada no ajuste dos dados experimentais seria o ápice da física do século XX e traria enormes mudanças.

Após essas discussões teóricas, eu iria apresentar o experimento usando o simulador PhET, mas infelizmente, ao apresentar o gráfico, o mesmo ficou todo

Figura 4.3 – Dados da emissão de um corpo negro na temperatura da superfície do Sol (à esquerda) e de uma lâmpada incandescente (à direita), obtidos com o uso do PhET. Disponível em: <<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/blackbody-spectrum>>.



Fonte: Espectro de Corpo Negro. Disponível em:

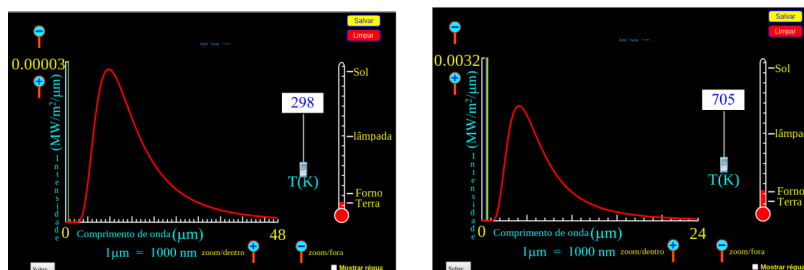
<<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/blackbody-spectrum>>. Acesso em 22 de ago. de 2018

desconfigurado no slide. A coloração ficou escura. Não deu para identificar quase nada, nem os eixos, apenas a curva presente no gráfico. Com as dificuldades apresentadas, desenhei os gráficos ($I \times \lambda$) no quadro para as várias situações e discuti a natureza da curva experimental.

Dei destaque ao intervalo de comprimentos de onda que é visível a nós, ressaltando o espectro da luz proveniente de materiais/objetos/corpos aquecidos. Fiz isso de forma que eles visualizassem o intervalo visível ao olho humano, para terem uma noção do significado daqueles dados. Discuti com eles os pontos de máximo presentes nos gráficos, os quais nos mostram o ponto mais intenso da emissão do corpo que está sendo analisado. Nos exemplos do próprio PhET, aparecem o espectro da radiação térmica do Sol, de uma lâmpada incandescente, de um forno convencional e da temperatura ambiente, como mostram as figs.(4.3 e 4.4).

Para o espectro de emissão do Sol, muitos alunos identificaram que a luz que ele emite tem uma “coloração” branca e que isso é o resultado da presença de todos os comprimentos de onda visíveis. Mas destaquei com eles, que após entrar

Figura 4.4 – Dados da emissão de um corpo negro na temperatura ambiente (à esquerda) e de um forno convencional (à direita), obtidas com o uso do PhET. Disponível em: <<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/blackbody-spectrum>>.



Fonte: Espectro de Corpo Negro. Disponível em:

<<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/blackbody-spectrum>>. Acesso em 22 de ago. de 2018

na atmosfera, a luz do sol não é totalmente branca, pois há interferências com o meio material da atmosfera.

Para a lâmpada incandescente, o espectro de emissão contém apenas uma parte¹¹ do espectro visível, e isso permitiu que eu questionasse os estudantes sobre qual seria a relação disso com a retirada das lâmpadas incandescentes de circulação no século XXI? Para ajudar nessa discussão, apresentei alguns gráficos mostrando a radiação proveniente do tungstênio, do qual apenas 10% pertence ao espectro visível. A turma em geral, ficou em silêncio, mas houve alguns palpites, de que a lâmpada produz muito *ultravioleta* (que eles identificam de maneira equivocada como sendo o calor) ou de que o seu filamento esquenta mais do que deveria. Mas, eles conseguiram entender que grande parte da radiação que o tungstênio produz é calor e está fora do espectro visível.

A partir das discussões sobre a lâmpada e o Sol, passamos a abordar o espectro de emissão para o forno e o meio ambiente, que fluíram de forma mais natural. Na primeira eu apenas questionei se uma lamparina é um bom objeto para iluminação de um ambiente escuro e todos responderam que não e, de maneira

¹¹ O tempo da aula não era suficiente, mas dentro da discussão sobre a lâmpada incandescente, poderia haver um desdobramento maior abordando o seu baixo rendimento, que é um dos motivos para hoje elas não serem mais fabricadas.

semelhante à lâmpada, a chama produzida emite radiações que possuem frequências e comprimentos de onda que ficam, na grande maioria, fora do intervalo do espectro visível. E para a temperatura ambiente, a mesma discussão.

Ficou evidente, que depois dessa discussão, eles conseguiram compreender que calor é uma radiação, uma forma de onda, e que possui grandezas mensuráveis a partir da física ondulatória. Foi muito interessante eles notarem isso, pois como dito nos relatos anteriores, essa relação não é feita no ensino médio, e aparentemente, nem no ensino superior.

Como o principal objetivo da aula era eles relacionarem energia com frequência, questionei se com os dados apresentados até o momento, seria possível dizer qual era a relação da energia com a frequência (ou com o comprimento de onda). Posteriormente às discussões, os questionei sobre essa relação e alguns disseram que quando você aumenta um o outro também aumenta, portanto são grandezas proporcionais. Aproveitei o raciocínio e os questionei novamente, como podemos representar essa relação analiticamente, com alguma equação. O silêncio fez-se presente em sala, mas foi muito interessante o olhar curioso da turma. Creio que eles nunca viram essa discussão e a relação de energia com grandezas presentes na física ondulatória.

Para chegar a tal relação, fiz uma breve discussão sobre o contexto histórico, falando que era a época da Revolução Industrial, na qual estava ocorrendo uma revolução em todas as áreas¹² e havia uma necessidade constante de desenvolvimento de novos materiais e de mudanças no comportamento e pensamento do mundo. Focando apenas na parte do desenvolvimento científico, havia a necessidade do desenvolvimento de fornos precisos para as siderúrgicas e a questão era como desenvolvê-los. Afinal, precisava-se de meios eficazes para moldar esses materiais e para isso, necessitava-se conhecer a temperatura exata dos fornos. Com essa problemática exposta, questionei a turma como poderíamos construir

¹² Na biologia, Darwin e o Evolucionismo. Na literatura, o nascimento do Naturalismo. Na sociologia e, em partes, na filosofia, o nascimento do Marxismo.

tais fornos e se termômetros convencionais seriam um mecanismo para medir a temperatura dentro desses fornos. A turma toda respondeu que usar o termômetro convencional seria impossível, pois a temperatura dentro desses fornos é muito alta, destruindo os termômetros. Teria que ser feita uma leitura indireta da temperatura. Vários alunos, depois das discussões, responderam que poderia-se fazer uma relação pela medida da radiação emitida pelos fornos.

Nesse mesmo sentido, falei sobre a Lei de Stefan, na qual ele estudou as radiações emitidas por um forno aquecido a uma certa temperatura. Ele desenvolveu uma relação entre intensidade e temperatura, a qual mais tarde foi melhor estudada através do uso de uma cavidade de um corpo negro¹³. A partir do estudo do corpo negro, chegaram na relação de Rayleigh-Jeans¹⁴.

Em seguida, aproveitei para discutir com eles, se a previsão teórica estava de acordo com os dados experimentais. A turma não identificou a diferença¹⁵ e apontei para o expoente da relação. Indaguei então a eles: “Como é o gráfico dessa equação?” Com isso, eles identificaram que a previsão teórica não poderia apresentar o comportamento que os dados experimentais mostravam, com um ponto de máximo tão evidente. Assim, essa relação teórica tinha algo de errado. Mas qual seria esse erro, indaguei?

Para fechar essa atividade, discorri sobre o trabalho de Planck, que desenvolveu uma equação matemática para descrever a curva experimental, corrigindo, de certa forma, a relação de Rayleigh-Jeans, o que lhe rendeu o prêmio nobel pos-

¹³ Neste ponto, aproveitei e discuti sobre a definição de corpo negro. A maioria da turma relacionou, inicialmente, o corpo negro a um corpo com coloração escura, mas eu informei que a ideia do corpo negro é referente apenas a sua capacidade de não refletir nenhuma radiação. Absorve tudo, não reflete nada, mas emite tudo. Confuso, muitos disseram, mas dei o exemplo do Sol para eles entenderem este conceito.

¹⁴ O nome é proveniente dos dois pesquisadores que desenvolveram essa relação. Fizeram isso separadamente, mas o primeiro nome foi o último a desenvolver.

¹⁵ Foi algo que notei. Eles possuem uma certa dificuldade em relacionar os dados teóricos com os dados experimentais. Talvez esteja sendo precipitado, pois como estão no segundo período, muitos ali podem nunca ter tido contato com as atividades de laboratório.

teriormente. Falei sobre sua famosa fala, na qual ele assume tal feito e sugere maiores estudos para uma melhor compreensão física sobre a sua hipótese. Apresentei também outras curiosidades, como o fato dele ser mentor de Einstein.

4.3.3 Momento 3

Entreguei aos estudantes um questionário envolvendo os temas discutidos na atividade para ser entregue no final da atividade. Neste questionário solicitei que eles redigissem um pequeno texto relacionando a revolução industrial com as descobertas científicas que foram discutidas na aula. Dentro dessa relação, deveriam analisar temas que foram discutidos em sala, tais como: medida de temperatura através da análise da cor de um corpo, relação entre energia e frequência, o que tais descobertas significaram para a sociedade à época e que desafios foram colocados à sociedade perante esses novos problemas.

4.3.4 Análise da Produção dos Estudantes

O material que eles receberam continha a seguinte questão:

- Redija um pequeno texto falando como a revolução industrial influenciou nas descobertas envolvendo a interação da radiação com a matéria. Dentro deste texto, discuta: como podemos determinar uma cor através da medida de uma determinada temperatura?; como a energia e a frequência podem estar relacionadas?; o que representa cada uma dessas grandezas?; quais as modificações que o problema do corpo negro apresentou à física e quais seriam os desafios para os próximos anos?.

Pela leitura dos textos, foi possível perceber que os alunos conseguiram identificar as relações entre cores e frequências. A partir disso, percebi também que a ideia de verificar ou fazer a leitura da temperatura de um corpo através da radiação emitida, em forma de calor, foi bem absorvida por eles. Identificaram

que há um desconhecimento sobre a relação entre frequência e intensidade (energia), apesar de serem grandezas diretamente proporcionais. Além disso, grande parte dos alunos citou a revolução industrial, falando de como os avanços tecnológicos influenciaram nessas novas descobertas e nesse novo avanço tecnológico e científico. Seguem abaixo alguns exemplos de textos escritos por eles:

“Foi na revolução industrial que as máquinas ganharam ‘vida’. Se quissem forjar um aço de boa qualidade, necessita de um forno eficiente para forja-lo, com isso precisa controlar a temperatura ideal para um aço ideal. Mas, quando se está mexendo com altas temperaturas, não dá simplesmente para medi-las com um termômetro. Em vista disso, começaram a estudar e aumentar as pesquisas sobre radiações para determinar as temperaturas pelas cores do espectro eletromagnético.

Estudamos também, juntamente com o assunto citado acima, a frequência de uma onda, que sabemos que é inversamente proporcional ao seu comprimento, ou seja, se tem uma maior frequência há um menor comprimento de onda. Vimos uma cor que é exemplo claro disso, a cor azul, devido aos estudos sobre o espectro eletromagnético.

Vimos que o ‘pico’ de radiação da luminosidade do Sol é justamente onde fica os espectros visíveis, nossa capacidade de enxergar a radiação de uma lâmpada incandescente é mínima, a de um forno é praticamente imperceptível e a de um corpo com a temperatura ambiente é nula. Isso se deve aos fótons visíveis, os outros são liberados através de calor e ultravioleta c/ou infravermelho” (Aluno 3)

"A Revolução Industrial ocorreu na Inglaterra. Quando surgiu a produção de máquinas, como a máquina térmica. O desenvolvimento de uma bomba, a partir disso percebeu-se o conceito de potência, podendo usar isso nas máquinas a cavalo.

A frequência equivale a percepção de uma cor. Quando maior a frequência, o comprimento de onda é menor, e vice-versa. Um dado corpo pode absorver energia através de uma luz. A luz é emitida através de uma fonte de energia, quando maior a energia liberada, a luz emitida é mais forte. Então, entendemos que as cores mais quentes tem a frequência menor, e as cores frias tem frequência maiores. O corpo negro absorve toda radiação que o atinge, e emite radiação de alta frequência, quando a temperatura é maior.” (Aluno 5)

“A revolução industrial marcou o início de uma série de evoluções nas máquinas e processos, provocando um avanço tecnológico considerável na época. Juntamente com esses avanços surge a constante necessidade de aperfeiçoamento. Assim, várias pesquisas e experimentos são feitos buscando sempre uma melhor forma de otimização. Com a pesquisa em alta, aparecem questões que a Física, até então conhecida, não consegue explicar muito bem.

Uma dessas questões é o problema do corpo negro, que absorvia toda energia e emitia pouca radiação. Primeiramente Rayleigh e Jeans desenvolveram estudos para explicar o que acontecia na prática, mas foi Planck que solucionou o problema. A partir daí se faz possível a produção de aço com melhor qualidade, determinando as temperaturas pelas cores que sua radiação emite. Quanto mais ‘frio’ um corpo, mais avermelhada é a cor emitida por sua radiação. Quanto maior sua temperatura, mais azulado ou próximo do violeta é sua cor. Isso é utilizado inclusive como classificação de estrelas, por temperatura.

Outra relação é a energia-frequência. Quanto mais energia proporcionamos a um corpo, maior será sua frequência e consequentemente menor será seu comprimento de onda (como por exemplo: quando agitamos uma corda cada vez mais, aumentamos suas osci-

lação). Com isso podemos dizer que energia e frequência são diretamente proporcionais. A energia é uma grandeza que relaciona a interação entre dois objetos. Já a frequência, é o número de ciclos durante um certo período de tempo.

Com a solução do problema do corpo negro foi possível definir os corpos que melhor proporcionariam a identificação de luz visível, ou seja, os mais eficientes (exemplo: o sol e a lâmpada). A lâmpada pode ser aperfeiçoada para ser cada vez mais eficiente. Além disso, Planck, ao solucionar o problema, deixou em aberto uma explicação que envolvia os cálculos utilizados por ele. Mais tarde a mecânica quântica seria finalmente introduzida, com base nesse ato de ‘desespero’ de Planck” (Aluno 13)

4.3.5 Algumas Reflexões

De maneira análoga, a ideia era fazer a conexão dessa aula com a anterior, na qual vimos que a relação radiação e energia não estava clara. Por isso, voltei às discussões das cores e as suas diferentes características, que são as frequências. Achei que a problematização inicial sobre as diferentes cores da chama do maçarico, foi bem proveitosa e foi um bom motivador para as futuras discussões. A partir dela, percebi que a ideia das cores terem diferentes frequências e, sendo esta a característica fundamental para determiná-las, foi bem interpretada por eles.

Para reforçar a discussão e fazer a conexão com a definição de intensidade, os dois exemplos dados, da vela e do isqueiro, também foram bem proveitosos. Não houve dificuldades por parte deles em notar que algo "mais quente" possui uma coloração mais azulada. A dificuldade ficou em torno da identificação da relação entre frequência e energia. Como dito, se uma chama azulada nos dá a sensação de mais quente do que uma chama vermelha, isso quer dizer que temos mais energia

emitida por ela, ou seja, sua intensidade é maior. E com isso, a proporcionalidade entre frequência e energia/intensidade não foi difícil de estabelecer.

Porém, senti que o momento seguinte ficou desconectado deste primeiro. Apresentei a definição de corpo negro a eles, de forma que compreendessem isso nos momentos posteriores da aula. Nas discussões sobre os gráficos construídos por eles, perceberam que tinha alguma coisa faltando, pois seus gráficos ficaram semelhantes ao da teoria clássica, prevista por Rayleigh-Jeans. E isso foi um ponto interessante, pois ao apresentar o gráfico gerado pela teoria clássica, visualizaram que era semelhante ao deles. Porém, aqui há um erro que cometi, pois a relação que passei à eles não foi a desenvolvida somente por Rayleigh e sim, a de Rayleigh-Jeans. E além disso, essa teoria foi desenvolvida posterior a de Max Planck, quando James Jeans relacionou a energia da radiação de um corpo negro com a temperatura da fonte emissora. Infelizmente, isso foi um erro que percebi somente após às aulas e não repassei a eles essa correção.

Na sequência, usaríamos o PhET de Corpo Negro, que não ficou visível no data-show e isso foi um problema, pois seria o momento em que a previsão clássica seria confrontada com os dados experimentais. Para contornar essa situação, com os gráficos projetados pelo data-show, usei o pincel e desenhei por cima deles os dados do PhET e assim, pudemos discutir os dados experimentais. Creio que foi uma discussão muito rica que tivemos desse momento para frente, desde o espectro do sol até o espectro da temperatura ambiente. Como dito, não dei muitos detalhes técnicos sobre as lâmpadas, mas a discussão sobre o espectro emitido e sua eficiência chamou muito a atenção dos alunos, principalmente a baixa faixa do espectro visível que a lâmpada emite, respondendo em partes, a sua ineficiência e substituição pelas lâmpadas de led e as fluorescentes.

Foi bastante interessante esse momento, pois mesmo com toda essa rica discussão e detalhes que ainda não explicamos, no momento posterior a discussão do PhET a turma sentiu a necessidade de uma explicação melhor sobre a carac-

terística do gráfico. E além disso, sentiam também que devia haver uma relação entre energia/intensidade e frequência. Apesar disso, senti que a discussão sobre o contexto histórico em que se desenvolveu a discussão sobre a radiação do corpo negro e sua problemática, ficou em um momento errado da aula. Talvez, modificar a proposta para o início da aula, para encaixar essa discussão sobre o contexto, seja melhor mas os alunos participaram da aula, visto os textos que produziram.

Por fim, ao notarem que havia algo faltando, tanto graficamente como quantitativamente (na equação), a explanação sobre o desenvolvimento do trabalho de Planck também foi bem interessante, pois ficaram muito curiosos sobre mais detalhes desse trabalho e de como ocorreu tudo isso. Infelizmente, tanto para iniciantes no curso de física como para estudantes do ensino médio, não é razoável desenvolver quantitativamente tal relação, sendo que há pré-requisitos necessários que os estudantes ainda não tiveram, tais como: cálculo II, física 2, termodinâmica e a própria ondulatória em si, e isso pode ser um problema para eles. Porém, apesar disso, é possível discutir com os alunos os resultados qualitativamente a partir do gráfico, e não aprofundar as discussões, baseado nas relações encontradas pelos cientistas citados. Pode-se analisar os dados e até mesmo, fazer uma relação direta com uma situação comum, tal como a iluminação que uma vela e uma lâmpada fluorescente geram, sem discutir esses dados qualitativamente.

Vi que ao término dessa aula, pelas conversas entre eles e também ao questioná-los, muitos saíram entusiasmados e curiosos sobre a constante de Planck, além disso, animados de que irão estudar isso no curso e poder entender um pouco melhor sobre essas questões. Apesar dos possíveis momentos desconexos da aula, creio que foi um encontro muito rico e com muitas informações, que poderão guiá-los no curso e, possivelmente, em suas futuras carreiras.

O texto promovido pelo questionário, achei que resume bem as três aulas. Os alunos ficaram atentos às aulas e participaram constantemente das discussões. O que mais me chamou a atenção é que conseguiram entender como o contexto

histórico se encaixou nesse desenvolvimento científico e como ele foi um agente motivador para tal. Portanto, sem muitas delongas, a presente aula cumpriu os objetivos e, por esse questionário, digo o mesmo das duas aulas passadas.

4.4 Atividade 4 – O Efeito Fotoelétrico

Essa atividade teve como objetivo geral a discussão do fenômeno que, posteriormente ficou conhecido como Efeito Fotoelétrico e de como ele está relacionado com os eventos anteriores. Isso foi feito a partir da discussão de um problema, envolvendo novamente a interação da radiação com a matéria e para o qual a física clássica não encontrava respostas satisfatórias.

Como nessa atividade faríamos a inserção de um novo tema, não houve a necessidade de uma revisão dos tópicos estudados anteriormente. Foi necessário apenas uma organização do que havia sido desenvolvido até o momento, ressaltando as questões chaves de cada atividade, que seriam essenciais para o entendimento de alguns tópicos presentes nesta atividade. As principais questões elencadas contemplaram:

- Aula 1 – As diferenças entre Física Clássica e Física Moderna;
- Aula 2 – A relação da Energia com as grandezas da Física Ondulatória (frequência ou comprimento de onda);
- Aula 3 – Como essas grandezas estão relacionadas e como essa relação é representada.

Para essa atividade foram utilizados slides, discussões dialogadas ao longo da aula e um simulador computacional.

De maneira análoga as atividades anteriores, a atividade também foi estruturada em três momentos específicos e foi planejada a partir dos seguintes objetivos de ensino:

- **Objetivos**

- ★ Discutir o experimento de Lenard;
- ★ Compreender as funcionalidades do aparato experimental utilizado por ele;
- ★ Discutir a interação radiação-matéria, a partir do experimento;
- ★ Desenvolver o conceito de fóton.

O quadro (4.4) apresenta uma descrição da atividade 4.

Quadro 4.4 – Descrição da atividade 4, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa da atividade.

Momentos	Duração	Descrição
1	30 min	Apresentar e discutir os trabalhos realizados por Heinrich Hertz. Discutir o experimento de Philipp Eduard Anton von Lenard. Discutir o Efeito Fotoelétrico. Desenvolver o conceito de fóton.
2	40 min	Discutir o efeito fotoelétrico utilizando o simulador PhET.
3	30 min	Avaliar os conhecimentos desenvolvidos ao longo da atividade.

Fonte: Autor (2019).

O tempo esperado para a realização dessa atividade não foi suficiente, pois a turma apresentou dificuldades em entender o aparato experimental utilizado no Efeito Fotoelétrico e as discussões da atividade do PhEt, também levou um tempo maior do que esperado. Portanto, foi usado os primeiros 25 minutos da aula 5 para o encerramento desta. Assim, a descrição desse fechamento está descrito aqui.

4.4.1 Momento 1

Iniciei a atividade, realizando uma exposição oral sobre o trabalho de Heinrich Hertz, dando destaque ao fato de que o experimento estava sendo usado na tentativa de detecção das ondas eletromagnéticas descritas por Maxwell.

Fiz a discussão tendo como base o vídeo biográfico sobre Lenard¹⁶, o qual mostra que ele, tendo como referência os experimentos e trabalhos de Hallwachs¹⁷, que havia demonstrado que a luz ultravioleta permitiria o aparecimento de descargas elétricas, observou que ela faz com que elétrons sejam emitidos da superfície de um catodo, quando este é exposto a luz. Este fenômeno ficou conhecido, em um momento posterior, como **Efeito Fotoelétrico**.

Depois desta introdução, apresentei para os estudantes a figura (2.7) que representa um esquema do aparato experimental utilizado por Lenard e, a partir dela, os questioneei sobre o papel dos seguintes componentes, presentes no arranjo experimental:

- A – Amperímetro;
- B – Bateria;
- C – Placa emissora de elétrons;
- D – Placa receptora de elétrons;
- E – Elétrons ejetados;
- F – Fonte de luz.

Após uma discussão sobre o experimento, apresentei cada um dos componentes presentes no arranjo experimental e destaquei qual foi o resultado observado por Hertz: a luz ultravioleta possibilitava, de fato, o aparecimento de descargas elétricas e, a partir dessa descarga, era possível detectar a presença de uma corrente elétrica, utilizando o amperímetro, quando se aplicava uma tensão elétrica ao experimento. Isso foi o que Hertz observou!

¹⁶ Philipp Eduard Anton von Lenard Biographical. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1905/lenard/biographical/>>. Acesso em 14 de ago. de 2018.

¹⁷ Wilhelm Hallwachs. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Hallwachs>. Acesso em 14 de out. de 2019

Percebi pela expressão da maioria da turma, que essa discussão ficou bem confusa e tentei, então, mudar a estratégia. Fui para o quadro e tentei explicar de uma outra forma. Fiz o desenho da fig. ??, porém fui discutindo e desenhando ao mesmo tempo. Frisei a ideia de que a luz proveniente da fonte luminosa possuía uma energia luminosa (o que eles já conheciam). Com isso, foi possível fazer uma analogia com o fato de que quanto maior a luminosidade dessa luz, mais energia ela transporta, deixando claro para eles que essa luz, assim como qualquer outra, por ser uma radiação, possuía uma frequência associada a ela. Portanto, pelo que já tínhamos discutido, quanto maior a energia luminosa maior a frequência. Nesse ponto, relembrei com os alunos o exemplo que o Professor Antônio Marcelo havia dado utilizando uma corda: para criar mais ondas em uma corda, precisamos balançá-la mais rápido, assim mais energia gastamos para fazer isso. Continuando, falei sobre a tensão aplicada e como ela interferia no experimento, pois conforme modificamos seu valor, criamos um campo elétrico¹⁸ que faz com que a descarga elétrica (os elétrons) seja dirigida para a outra placa ou não, pois isso dependerá do valor da tensão.

Questionei a eles sobre o que aconteceria com essa energia, ao colidir com a placa metálica C. Alguns alunos responderam que essa energia seria transferida para a placa e outros que ela se modificaria. Com essas respostas, voltei ao que havia sido observado no experimento, que foi a aparição de descargas elétricas, e lancei a pergunta: *“Como elas apareceram, as descargas elétricas?”* Houve um silêncio na sala e ninguém se propôs a responder. Resolvi indagar a partir das respostas anteriores deles, de momentos antes: *“Ora, o que houve com aquela energia luminosa?”* Infelizmente, não houve nenhuma resposta e nenhum aluno arriscou um palpite sequer.

¹⁸ Como os alunos ainda não haviam cursado física 3 ou tópicos mais específicos de eletricidade e magnetismo, creio que esse ponto deve ser discutido com mais cautela, para não criar divergências e concepções erradas.

Nessa situação, expus a explicação no quadro, de que essa energia era transferida para os átomos da placa metálica e os elétrons da última camada de valência, eram arrancados do átomo, gerando a descarga elétrica. Aqui, falei sobre a infinidade de átomos que há e que os elétrons são espalhados em todas as direções da placa, e que alguns, de fato, iriam colidir com a outra placa. Isso explica o porquê, de mesmo sem tensão aplicada, termos uma leitura da corrente. O que acontece é que, ao aplicar uma tensão, criamos um campo que, ou atrai esses elétrons todos para a placa ou os repele. Foi interessante essa explicação, pois ficou mais claro para eles essa ideia de termos a leitura de corrente, mas o fato de termos descarga elétrica (elétrons saindo de uma placa para a outra) ainda estava bem confusa. E também, vi que os conceitos de tensão e corrente elétrica que no início não estavam claros para eles, ao final da aula se mostraram mais claros, parece que a aula foi uma oportunidade para eles relembrem estes conceitos.

Para fechar essa discussão, desenhei novamente o experimento na lousa utilizando agora duas fontes de luz, que possuem frequências diferentes. O objetivo era fazermos uma análise para essas duas fontes luminosas. Repeti a explicação do experimento, no qual a luz incide na placa e é possível a leitura de uma corrente elétrica. Portanto, a partir dos desenhos, discutimos o que acontece com a leitura que teremos para a corrente, a partir da modificação da tensão. E isso foi concomitante à construção de um gráfico $i \times V$.

A discussão procedeu da seguinte forma. Como temos duas fontes de luz com frequências diferentes, a leitura de corrente também deveria ser diferente. Com isso exposto, disse a eles que, inicialmente, utilizaríamos uma tensão V fixa e que iríamos variá-la ao longo do tempo. Questionei à turma se a leitura de corrente seria igual para as duas fontes luminosas e eles responderam que não. Então desenhei os dois pontos referentes às leituras das correntes para a tensão dada, sendo um deles acima do outro, o que representa que a luz com maior frequência estava produzindo uma corrente maior. Questionei o que aconteceria se eu bai-

xasse o valor dessa tensão, até chegar a zero, e alguns responderam que o valor da corrente iria diminuir. Expus que na verdade, o que Lenard observou foi que a corrente permanecia constante até um determinado ponto e se reduzia até um valor onde V é zero, para as duas fontes luminosas. Da tensão $V = 0$ até um determinado valor, onde a leitura de corrente começa a se tornar constante, é onde o campo está se formando e atraindo as cargas de forma a encontrar a outra placa metálica. Expliquei que esse fato não era algo que a física clássica não conseguisse responder, pois como dito anteriormente, ao aplicarmos tensão criamos um campo elétrico que atrai todas as elétrons emitidos pela placa. E que, independente do quanto aumentarmos a tensão, ela permanecerá constante, pois todas as elétrons estão chegando na placa.

Nesse momento questionei o que aconteceria se aplicássemos uma tensão negativa. Expliquei para eles, que ao aplicarmos uma tensão negativa, invertemos o campo, o que faz com que as cargas negativas sejam repelidas, ao contrário da tensão positiva, que as atrai. Novamente, perguntei a turma como ficaria isso no gráfico se diminuíssemos cada vez mais. Não houve participação dos alunos, o que me decepcionou um pouco, pois me pareceu que não estavam entendendo nada. Assim, expus que a leitura que Lenard fez ao diminuir a tensão ao longo do tempo, tensões menores que zero ($V < 0$), foi intrigante. Desenhei no gráfico, de forma que as duas retas, provenientes das fontes luminosas, se encontram em um mesmo valor $-V_0$, o qual nos diz que nesse ponto não chega nenhuma carga. Logo, para as duas fontes luminosas diferentes há uma mesma tensão que não permite chegar nenhuma carga elétrica.

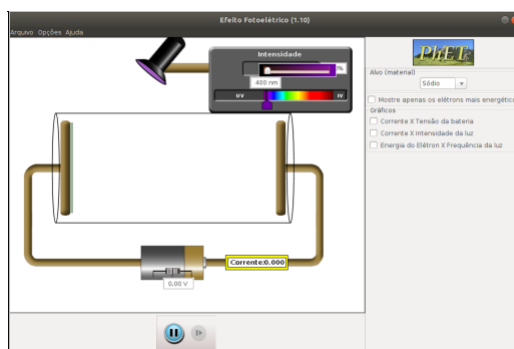
Não houve nenhuma cara de espanto ou de surpresa. Questionei a eles se o conhecimento da física clássica seria suficiente para explicar os resultados observados e todos disseram que não. Apresentei, então, quais eram os argumentos da física clássica para explicar alguns resultados observados no experimento:

- A energia transferida ao material, a partir da luz incidente sobre ele, deveria ser contínua, conforme previsto pela natureza ondulatória da luz. Portanto, para que os elétrons se soltassem do material, levaria um certo tempo para que eles adquirissem a energia necessária para isso. No entanto, isto não foi observado em nenhum experimento. Se os elétrons saem, eles o fazem instantaneamente. Eles não precisam acumular energia;
- Para determinadas frequências da luz incidente, o fenômeno não era observado. Nem mesmo se a placa fosse exposta a longos períodos de tempo, com uma intensidade alta e constante.

4.4.2 Momento 2

No momento seguinte, eles utilizaram o simulador virtual para o Efeito Fotoelétrico do PhET¹⁹. A figura (4.5) mostra a tela inicial do simulador.

Figura 4.5 – Tela inicial do simulador virtual PhET para o Efeito Fotoelétrico.



Fonte: Efeito Fotoelétrico. Disponível em:
<https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric>. Acesso em 25 de ago. de 2018

¹⁹ Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric>. Acesso em 25 de ago. de 2018

Antes de iniciarem o experimento no simulador, discutimos novamente sobre os principais problemas que a física clássica enfrentava para responder satisfatoriamente aos resultados experimentais observados com este tipo de experimento.

Após essa discussão, dividi a turma em grupos para o desenvolvimento da atividade do PhET e para que eles respondessem ao questionário. Infelizmente, o tempo que imaginei que eles levariam para resolver a atividade foi curto e eles levaram o restante da aula para conseguirem realizar a atividade proposta. No entanto, foi muito produtivo, pois o simulador possibilitou a eles perceberem que: diferentes fontes de luz geram resultados diferentes e que para diferentes materiais da placa também são obtidos resultados diversos.

A discussão inicial foi bastante útil para que eles percebessem de que maneira a estrutura dos materiais interfere nos resultados. Por exemplo, eles notaram que a quantidade de elétrons do material interfere nos resultados bem como a frequência da luz incidente.

Como não houve tempo para finalizar a atividade, o momento 3 que seria usado para apresentar oralmente a solução que Einstein propôs para os questionamentos que a física clássica não conseguia responder, além da avaliação, ficou para os momentos iniciais da próxima aula. Mas como dito anteriormente, a descrição está descrita aqui.

No começo da atividade 5, Comecei a aula retomando o ponto em que havíamos parado na atividade anterior, que era discutir sobre as conclusões obtidas a partir do simulador do Efeito Fotoelétrico. Para isso, apresentei os postulados de Einstein para os dados “estranhos” do experimento de Lenard. Falei sobre o que é um postulado e nenhum aluno se manifestou²⁰. Defini com eles que postulado é algo que se afirma a partir de uma premissa e se mantém, até que se prove o contrário. Em seguida, apresentei como os postulados de Einstein explicavam as

²⁰ Nesse ponto, percebo algo que considero falho no curso de física. Teoria, leis, postulados, teoremas, esses termos, mesmo os alunos da graduação mais adiantados no curso, não conhecem. Não sabem o que são de fato, quais são as diferenças entre eles. Seria um ponto a se pensar: como e em que momento discutir isso no curso.

anormalidades observadas no experimento de Lenard, para as quais, de acordo com a Física Clássica, não se encontravam respostas. Os postulados são os seguintes:

- A luz é composta por pacotes ínfimos de energia, que ocupam um pequeno volume de espaço, o qual levou o nome de fóton²¹;
- A energia desse pacote é dada por: h , a constante de Planck, multiplicada pela frequência – $h\nu$:

$$E = h\nu \quad (4.3)$$

- Essa energia é transferida para o elétron da placa metálica. E isso acontece em grau de paridade: um fóton para um elétron.

Quando falei sobre o fóton, grande parte da turma mostrou ter conhecimento do que seja isso, inclusive um aluno falou o que ele “representava”: um pacote bem pequeno de energia. E essa mesma energia, seria dada por $h\nu$.

Feito isso, apresentei o gráfico gerado por Milikan (2.9) em 1914 e aproveitei os minutos, só para explicar que ele ganhou o nobel de física²² sobre suas pesquisas sobre o Efeito Fotoelétrico e cargas elétricas. E também desenvolvi a equação com os postulados de Einstein. Não dei explicações mais aprofundadas sobre ela e apresentei a fórmula final:

$$V_o = \frac{h\nu}{e} - \frac{w_o}{e} \quad (4.4)$$

no qual inserimos os postulados propostos por Einstein, onde aparece novamente a constante de Planck. Muitos questionaram a presença da constante h :

²¹ Antes de falar o nome propriamente dito, fóton, alguns alunos citaram: “Ah, esse pequeno pacote de energia é o fóton né?”. Aqui novamente, vem a discussão de como eles já tinham conhecimento disso. Documentários? Séries?;

²² Vencedor do Nobel Robert Millikan questionava teoria de Einstein sobre fótons. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/atualidades/vencedor-do-nobel-robert-millikan-questionava-teoria-de-einstein-sobre-fotons/>>. Acesso em 17 de out. de 2019.

de onde veio? De novo? Mas porquê? Aproveitei e pedi que eles encontrassem o valor dessa constante a partir dos dados do gráfico. Tarefa simples, pois os valores das grandezas já estavam ali e era apenas aplicar a equação aos dados. Encontraram o valor, que era coincidente com o valor que Planck encontrou em seu trabalho, e ficou o questionamento final: se esse h tinha algum significado físico! Pois afinal, uma constante com valor tão pequeno, interferir nesses fenômenos físicos deve ter uma explicação associada com isso.

4.4.3 Análise das Respostas ao Questionário

No planejamento dessa aula, a nossa previsão era de que uma aula apenas seria suficiente para o seu desenvolvimento. Porém, houve duplas que levaram mais tempo na realização da atividade no PhET, o que acarretou a utilização de mais uma aula para dar fechamento à simulação computacional. Assim, em conversa com o professor da disciplina, utilizamos mais uma aula para encerrar as discussões sobre o Efeito Fotoelétrico. Como ficou faltando apenas a parte de encerramento, a aula seguinte não foi prejudicada. O primeiro questionário é referente às discussões posteriores, sendo ele teórico e individual, envolvendo questões da aula e de conhecimentos prévios, que foram discutidas no início da atividade 5. O segundo, foi desenvolvido na 4ª aula, pois é referente ao simulado PhEt, que foi realizado em duplas.

1º Questionário – 4ª Atividade

Este questionário era composto por quatro questões discursivas, descritas a seguir.

Questão 1 – O que você compreende como sendo uma onda eletromagnética?

Ao analisarmos as respostas para essa questão, podemos dividi-las em três grupos: um grupo que cita a propagação no vácuo (3 alunos), um grupo que cita, no geral, a presença de um campo elétrico e magnético (5 alunos) e um outro grupo que

argumenta sobre a liberação de energia (2 alunos), totalizando 10 alunos presentes a essa atividade

Como em nenhuma aula havíamos desenvolvido o conceito de onda eletromagnética, as respostas nos mostram as concepções iniciais dos estudantes e/ou²³ como eles construíram esse conceito ao longo de suas formações anteriores ou mesmo em seus momentos na graduação, com relação à este tema.

Podemos perceber, então, que há diferentes concepções sobre onda eletromagnética na turma.

Dos que falaram sobre a propagação no vácuo, percebemos a presença da definição clássica que é dada no ensino médio, baseada exclusivamente no meio de propagação da onda. Seguem as respostas:

“Onda eletromagnética é aquela que pode se propagar no vácuo”.

(Aluno 16)

“É uma onda que se propaga sem que precise de um meio”. (Aluno

14)

“Uma onda que não necessita de meios materiais para se propagar”. (Aluno 3)

Dos que destacaram a presença de um campo elétrico e magnético percebemos que há uma definição e uma percepção mais apurada do que seja uma onda eletromagnética. Seguem alguns exemplos de respostas:

“Uma onda que seja a união de duas ondas perpendiculares entre si, uma elétrica e outra magnética”. (Aluno 8)

“São ondas reproduzidas no espaço, são as ondas de rádio, celulares, TV. É a combinação do campo elétrico e magnético”. (Aluno 5)

²³ Coloco e/ou pois podemos ter alunos que não estudaram ondas eletromagnéticas em seus ensino médio e só lhe foram apresentados na graduação.

“Oscilações em fase dos campo magnéticos e elétricos que, autos-sustentando se separados das cargas elétricas”. (Aluno 6)

Quanto aqueles que falaram sobre a liberação de energia, podemos perceber que eles possuem um entendimento de que as ondas eletromagnéticas são resultado de um processo físico, conforme as duas respostas:

“Um meio de propagação de energia em forma de ondas, como um meio de variação de frequência ou algo do gênero”. (Aluno 9)

“É todo tipo de onda gerada por uma liberação de energia. São exemplos as micro-ondas, a luz visível, os raios X, o ultravioleta e o infravermelho”. (Aluno 13)

Questão 2 – Quais dos resultados observados no efeito fotoelétrico não são explicados pelo eletromagnetismo?

As respostas para essa questão foram bem variadas, não sendo possível encontrar uma semelhança entre elas. Creio que isso se deve ao fato da complexidade da questão e do próprio tema em si. Algumas respostas nos mostram que houve uma confusão entre os conceitos discutidos e na própria linha cronológica das definições. Um exemplo para esse último problema é:

“A quantização da energia, e que a velocidade com que os elétrons são ejetados não depende da quantidade de fóton”. (Aluno 6)

Alguns alunos citaram o fato da emissão instantânea de elétrons quando a luz incide:

“Maior intensidade de luz (sem mudar a frequência), faz com que a corrente aumente, já o potencial de corte se mantém o mesmo. A corrente aparece instantaneamente”. (Aluno 8)

“A imediata saída dos elétrons em resposta à luz”. (Aluno 11)

A maioria dos alunos citou a liberação de elétrons devido a incidência de luz no metal, sem mencionar explicitamente que seria necessário uma frequência adequada. Seguem alguns exemplos dessas respostas:

“Foi que assim que incide uma intensidade de uma onda eletromagnética em um metal em alguns casos a liberação de elétrons, não importando o tempo de incidência”. (Aluno 14)

“Quando se incide luz em uma placa metálica, ela libera elétrons”.
(Aluno 3)

Questão 3 – Descreva o efeito fotoelétrico.

De forma unânime, todas as respostas possuem semelhanças, citando a liberação de elétrons de um material, como consequência da incidência de uma fonte luminosa ou radiação eletromagnética. Eis alguns exemplos:

“É a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto a uma radiação eletromagnética”. (Aluno 6)

“É a emissão de elétrons por um material”. (Aluno 10)

A perspectiva era de que, depois das discussões realizadas na aula, as respostas convergissem para o fato do fenômeno não possuir uma explicação clássica. Creio que a ausência desse tipo de resposta se deve ao fato da explicação, durante a aula, ter sido confusa e não tão apropriada para eles, já que apresentaram dificuldades na compreensão do funcionamento de um circuito. Apenas um aluno explicou mais detalhadamente o experimento:

“É a liberação de elétrons por uma placa de metal quando esta é submetida a uma luz com certa intensidade. No experimento utilizado por Hertz, duas placas de metal foram isoladas em um sistema com gás rarefeito. As placas eram ligadas a um amperímetro e a uma bateria (bateria -> tensão; amperímetro -> corrente elétrica). Uma das

placas recebia uma certa quantidade de luz. Ela liberava elétrons que chegavam até a outra placa e era feita uma leitura no amperímetro”.

(Aluno 13)

Questão 4 – Como Einstein explicou o efeito fotoelétrico? Quais foram as suposições que ele teve que fazer para construir esta explicação? O que a ideia de fóton tem a ver com isso?

Pelas respostas a essa questão, há a necessidade de sua reformulação, transformando-a em algo mais simples e objetivo pois, embutida na questão, existem de fato 3 perguntas. Essa complexidade fez com que nenhum aluno respondesse de maneira sequencial, em forma de um pequeno texto.

Porém, de forma unânime todos citaram a luz como sendo formada por pacotes de energia, os fótons, como a explicação de Einstein para o fenômeno.

“Einstein, utilizando os estudos de Planck, elaborou a teoria de que a radiação era pacotes de energia (quanta), que se propagava como uma partícula. Ele estabeleceu então que a relação entre energia e frequência. Essas partículas são os fótons que, quando são absorvidos pela matéria, liberam um elétron”. (Aluno 13)

“Einstein explica que para que ocorra a ejeção imediata de elétrons da superfície, a energia de radiação estaria concentrada em fótons e não distribuída sobre a onda. Einstein fez previsão que variando-se a frequência da luz incidente e plotando-se, obtem-se uma reta, cujo o coeficiente seria a razão da constante de Planck pela carga do elétron”.

(Aluno 3)

É possível perceber, pelas respostas, que os estudantes tiveram algumas dificuldades com a compreensão do efeito fotoelétrico. Isso pode ser por causa da complexidade do experimento utilizado para realizar a discussão, pela própria con-

dução da atividade ou pela falta de conhecimentos prévios, não ficando evidente qual ou quais desses motivos foram os responsáveis por essa dificuldade.

2° Questionário – Simulação Computacional: O Efeito Fotoelétrico

Este questionário foi adaptado do material apresentado por Silva (2015), e contém 5 questões, que compõem um roteiro para a realização da atividade com o simulador virtual do PhET e que são apresentadas as seguir. Os estudantes, em grupos, realizaram a simulação.

Questão 1 – Escolham um elemento. O que ocorre se alterarmos os valores do comprimento de onda da radiação incidente?

Todas as duplas identificaram a mudança de liberação de elétrons quando se modifica o comprimento de onda da luz incidente. O experimento do PhET é bem simples e prático, e visualizar tal fenômeno não é tão complexo. Seguem alguns exemplos:

“Platina, altera a liberação do elétron da placa”. (Aluno 13 e Aluno 14)

“Sódio. O valor da corrente irá variar”. (Aluno 11 e Aluno 15)

“Latão. Em um certo comprimento de onda (425 nm) começa a passagem de elétrons”. (Aluno 3, Aluno 7 e Aluno 8)

Questão 2 – O que observamos, quando variamos a intensidade da radiação incidente, mantendo um determinado comprimento de onda?

De maneira semelhante ao item anterior, todos identificaram a liberação de elétrons como o fator que varia ao modificar a intensidade da radiação incidente.

“O valor da corrente também irá variar, sendo diretamente proporcional à intensidade da radiação incidente”. (Aluno 11 e Aluno 15)

“Aumenta a quantidade de elétrons”. (Aluno 3, Aluno 7 e Aluno 8)

Porém, um grupo citou também a velocidade dos elétrons:

“Se temos um comprimento de onda (248 nm) e a intensidade 0% os elétrons param de ser liberados; com ela a 50% os elétrons começam a ser liberados com maior velocidade e a 100% a quantidade e a velocidade bem maior”. (Aluno 1, Aluno 2 e Aluno 6)

Questão 3 – Visualize e explique o que ocorre quando aplicamos uma diferença de tensão entre as duas placas.

Todos os grupos identificaram que aplicando uma ddp entre as placas, ocorrerá um movimento de elétrons e uma leitura maior de corrente. Porém, nenhum grupo, em sua explicação, citou o campo elétrico como sendo responsável pelo movimento desses elétrons.

“A direção das partículas é dependente do polo (negativo ou positivo) da bateria”. (Aluno 5, Aluno 9, Aluno 10 e Aluno 16)

“Se a tensão é negativa o fluxo é ao contrário e se for positiva aumenta a velocidade dos elétrons na direção ao anodo”. (Aluno 13 e Aluno 14)

Questão 4 – Há conservação de energia no Efeito Fotoelétrico? Quais tipos de energia estão presentes no fenômeno?

Pelas respostas, essa questão requer modificação. A forma mais apropriada seria solicitar uma explicação do porque da conservação de energia ou como ela ocorre.

Os grupos apenas responderam sim ou não, sendo que apenas um grupo justificou sua resposta, porém de maneira errônea. Segue alguns exemplos:

"Existe. Tensão, intensidade e frequência."(Aluno 5, Aluno 9, Aluno 10 e Aluno 16)

"Sim, energia eletromagnética."(Aluno 13 e Aluno 12)

"Sim. Há conservação de energia cinética do elétron, onde a emissão de luz da lâmpada nas placas fotoelétrico causa mudança da velocidade do elétrons". (Aluno 1, Aluno 2 e Aluno 6)

Questão 5 – A partir dos resultados obtidos com esse experimento, é possível discutir algo a respeito do comportamento da luz? Descreva brevemente o que você considera que podemos falar a respeito desses resultados e de como eles estão associados a natureza da luz.

De maneira semelhante à algumas questões anteriores, pelas respostas do alunos, a questão não parece ter sido clara para eles. A maioria respondeu a questão, voltada aos conceitos técnicos discutidos sobre o experimento em aula e não discorreu sobre eles. Apenas um grupo desenvolveu uma resposta pensando sobre o comportamento da luz:

"Ela pode interagir com a matéria de diferentes formas, podendo gerar corrente quando incidida sobre uma placa metálica. Ela se comporta de uma maneira dual, sendo uma onda e uma partícula. Quando se propaga no espaço se comporta como uma onda, e quando incide em algum objeto se comporta como partícula". (Aluno 11 e Aluno 15)

E, conforme dito acima, os demais se atentaram aos detalhes técnicos do fenômeno. Seguem alguns exemplos:

“Sim. Quanto maior a intensidade da luz e menor o comprimento de onda (UV) maior será a emissão de elétrons”. (Aluno 1, Aluno 2 e Aluno 6)

“Ela é capaz de gerar corrente a partir da energia relacionada a sua frequência”. (Aluno 3, Aluno 7 e Aluno 8)

“Ela se comporta retirando elétrons da placa, a intensidade da luz e seu comprimento de onda influencia na quantidade de elétrons retirado”. (Aluno 13 e Aluno 14)

4.4.4 Algumas Reflexões

Senti que essa aula ficou muito massante. Contrariamente às aulas anteriores, não foi por conta dos slides e sim, por conta da quantidade de informação envolvendo a temática Efeito Fotoelétrico. A começar pela própria introdução. No início, quando fui falar sobre a descoberta das ondas eletromagnéticas, feita por Heinrich Hertz, envolvendo a faísca entre dois eletrodos, ficou algo muito fantasioso, de difícil percepção para eles. Além disso, ficou sendo totalmente expositivo, o que é um ponto que requer uma metodologia diferente e uma apresentação menos formal e mais didática, podendo até se pensar em uma atividade para que os alunos desenvolvam.

Ao falar da atividade experimental, percebi que muitos alunos tiveram dificuldade em entendê-la. E pude notar isso pelos olhares e pela falta de discussão e participação deles, e a saída que encontrei no momento foi fazer passo a passo no quadro, desenhando e representando cada etapa do experimento. Poderia ter feito o uso do slide ou até mesmo do aparato que o PhEt usa, porém, no momento, achei mais apropriado ir para a lousa e fazer um esquema, no qual iria discutir cada detalhe dele. Ao fazer isso, percebi que alguns conceitos prévios são necessários para essa aula, tais como: campo elétrico, corrente elétrica e dois tópicos específicos

de estrutura da matéria: ligações químicas e propriedades dos materiais²⁴ Porém, analisando o questionário e tentando construir uma outra percepção, vemos que a metodologia e a disposição dos momentos da aula podem ter sido responsáveis por essa ausência de participação e compreensão por parte deles sobre o experimento. Mas também percebi que a abordagem que fiz, usando o quadro, auxiliou no entendimento sobre o aparato experimental, mesmo que eles não tenham discutido sobre.

Outro ponto em que ocorreu um imprevisto foi em relação ao tempo disponibilizado para que eles respondessem ao questionário sobre a atividade no PhET. O tempo previsto para a realização desse questionário foi insuficiente. Porém, não julgo que isso tenha sido um ponto negativo, pois gerou discussões muito ricas na aula, tais como: o tipo de material e como sua estrutura atômica responde à esse efeito, como a frequência da fonte luminosa interfere e qual é a sua relação com o material, como o campo elétrico gerado interfere nesse conjunto, entre outros. Alguns poucos grupos, apenas se restringiram à responder o questionário, porém os demais responderam, analisando cada detalhe do simulador e questionando cada efeito observado. Isso, como dito, foi algo muito positivo! Talvez a melhor forma de desenvolver essa aula não seja expositiva, e sim, algo que seja construído juntamente com os alunos, usando o simulador, por exemplo.

Com relação ao questionário do simulador, as duas últimas perguntas necessitam ser modificadas. A penúltima, creio que solicitar uma explicação do porque da conservação de energia ou como ela ocorre, seja mais apropriado. E a última, questionar sobre o comportamento da luz e solicitar uma explicação sobre ela, pois as respostas dos alunos ficaram voltadas apenas aos termos técnicos. Nas demais perguntas, os alunos identificaram os principais pontos, isto é, perceberam que se há modificação de material e frequência da fonte luminosa, os dados coleta-

²⁴ Nesse caso, como as ligações químicas influenciam um material ser bom condutor ou não.

dos serão diferentes. Com relação ao segundo questionário, irei comentar na aula posterior.

A finalização dessa aula, que ocorreu nos 30 minutos iniciais da próxima aula, que levou em média 20 minutos, foi bem interessante. Apesar da densidade dos conteúdos e das discussões, a partir do gráfico, pude notar que ficou mais claro os resultados para eles, do que os apresentados na semana passada. Participaram e discutiram mais, o que foi bem proveitoso. Porém, analisando melhor, a aula sobre o Efeito Fotoelétrico, deveria ser reorganizada em dois encontros ou, até mesmo, em três. A justificativa é que com maior tempo, podemos desenvolver melhor alguns temas, como: fótons e quantização de energia. Fora isso, alguns temas da história da física que não pudemos levar adiante e que eram importantes eles conhecerem. Um exemplo, é a discussão que Milikan gerou ao discordar de Einstein sobre seus postulados, que, mesmo com os dados, ele ainda desacreditava deles. Além disso, deveria ter tido mais cuidado com a cronologia dos fatos, pois primeiro veio Lenard, depois Einstein e, por fim, Milikan. As discussões que promovi devem ter deixado um pouco isso fora de ordem.

Na análise dos questionários, o segundo da 4ª aula, percebemos que a concepção que eles possuem de ondas eletromagnéticas é relacionado apenas ao meio de propagação e a interação dos campo elétrico e magnético. Mas aqui me chama a atenção, pois ao discutirmos o experimento em si, eles mostraram não compreender o que seja um campo de fato. Então, fica uma dúvida se apenas sabem o que é ou se compreendem o que seja um campo. Nas questões do experimento do Efeito Fotoelétrico, percebi que o questionário ficou bom. A maioria percebeu os pontos que a física clássica não respondia aos dados coletados com o experimento. No entanto, na descrição, citaram apenas o fato da liberação dos elétrons e não o fato de que, para qualquer fonte luminosa, ao aplicarmos tensão negativa (ou seja, invertemos o campo elétrico), todas coincidiriam na mesma voltagem. E por fim, a última questão, requer modificação pois ficaram muitas questões den-

tro dela e os alunos não responderam de maneira sequencial. Portanto, a aula do Efeito Fotoelétrico, apesar dos problemas encontrados com tempo e conteúdo, foi uma aula muito importante para eles, dentre todas, pois levantou a discussão de um tema muito importante na física: campo. Além disso, pensar sobre o que é uma radiação, inclusive o que é a luz em si foi muito proveitoso.

4.5 Atividade 5 – Dualidade Onda Partícula

Essa atividade teve como objetivo geral o desenvolvimento do problema associado ao comportamento dual da radiação. De início, há uma discussão sobre o experimento das fendas, levando em conta duas situações, nos quais teremos uma fenda simples e outra, uma fenda dupla. A discussão será feita com um experimento mental, no qual teremos bolinhas de gude e uma vibração em uma superfície aquosa, para visualizar o fenômeno, para as duas fendas. Durante as discussões, aparecerão algumas características interessantes, no qual solicito que os alunos expliquem o que ocorrerá no experimento.

Como nesta atividade faríamos a inserção de um novo tema, não houve a necessidade de uma revisão dos tópicos anteriores. Foi necessário apenas uma revisão do que havia sido desenvolvido até o momento e quais as questões chaves presentes em cada momento, pois estes conceitos seriam essenciais para o entendimento de alguns tópicos presentes nesta atividade. Os pontos que foram elencados como importantes de serem mencionados nesta breve introdução foram:

- As diferenças entre a Física Clássica e a Física Moderna;
- A relação da energia com as grandezas da ondulatória (frequência ou comprimento de onda).

Devemos lembrar também que na atividade 4, o tempo não foi suficiente para que ela fosse encerrada. Assim, reservamos alguns minutos iniciais para apre-

sentar os postulados de Einstein para os problemas que a mecânica clássica não resolvia com relação ao Efeito Fotoelétrico.

Para isso utilizamos slides, discussões dialogadas ao longo da aula e um simulador computacional.

De maneira análoga, esta atividade está estruturada em três momentos específicos e foi planejada a partir dos seguintes objetivos de ensino:

- **Objetivos**
 - ★ Discutir o experimento da fenda dupla para uma onda e para uma partícula.
 - ★ Discutir as contribuições dessas descobertas para a sociedade.
 - ★ Apresentar o Efeito Compton e o problema para interpretar fisicamente seus resultados.
 - ★ Apresentar Maurice de Broglie e a sua hipótese.

O quadro (4.5) apresenta uma descrição da atividade 5.

Quadro 4.5 – Descrição da atividade 5, apresentando a duração prevista e uma discussão de cada etapa.

Momento	Duração	Descrição
1	20 min	Discutir o comportamento de uma onda e de uma partícula passando por uma fenda dupla.
2	30 min	Discutir as contribuições dessas descobertas para a sociedade. Apresentar Maurice de Broglie e Louis de Broglie e as suas hipóteses, bem como suas biografias.
3	20 min	Avaliação dos conceitos discutidos na atividade.

4.5.1 Momento 1

Iniciei as discussões sobre a dualidade onda-partícula, realizando a problematização com os estudantes sobre o experimento da fenda dupla. A discussão ficou em

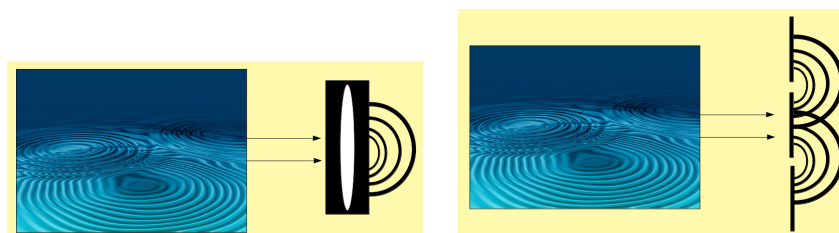
torno de duas situações específicas: do comportamento de uma bolinha de gude e de uma frente de onda na superfície da água (provocada por uma perturbação qualquer). Para os dois casos, consideramos a situação para o caso de uma fenda simples e para uma fenda dupla. Para ambos, discuti com todos qual seria a leitura após os dois entes atravessarem as fendas. As duas situações podem ser vistas nas figuras (4.6) e (4.7).

Figura 4.6 – Bolinhas de gude incidindo em uma fenda simples (à direita) e em uma fenda dupla (à esquerda).



Fonte:Autor 2019

Figura 4.7 – Perturbações em uma superfície aquosa incidindo em uma fenda simples (à direita) e em uma fenda dupla (à esquerda).



Fonte: Autor (2019)

Para isso, iniciei com o seguinte problema: *"Tenho algumas bolinhas de gude e tenho duas situações: jogar essas bolinhas de forma aleatória, tendo uma fenda ou duas para elas atravessarem. O que verei no anteparo depois dessas duas situações?"*. Com o problema posto, discuti com os alunos os possíveis resultados para o experimento. Solicitei que alunos que tivessem ideias diferentes, fossem ao quadro e explicassem suas perspectivas sobre o experimento, justificando a sua opção.

Unanimemente, a turma respondeu que teríamos um risco, para o caso de uma fenda, e dois riscos para o caso de duas fendas. Repeti a questão, só que agora essas fendas iriam estar dentro de um poço com água e eu jogaria uma bolinha de gude na superfície da água, próximo a estas fendas. No caso da primeira, uma fenda apenas, ficou fácil visualizar o padrão que se formaria, uma frente de onda iria se propagar. No outro caso, questionei a eles se teríamos o mesmo padrão e a turma respondeu que não. Solicitei que um aluno viesse no quadro e desenhasse o padrão que se formaria. Ao desenhar, o aluno não citou as frentes de ondas e o que aconteceria quando houvesse o encontro de duas frentes de onda. Mencionou apenas que teríamos as duas frentes de onda se propagando.

Discuti com eles e questionei se uma onda não interfere na outra, e houve respostas que sim e outras que não²⁵. Como vi a grande dificuldade da turma em definir tais conceitos, expus que as ondas interferem e que teremos um padrão se formando com a soma das frentes de ondas. Em seguida, apresentei o vídeo do Dr. Quantum²⁶sobre dualidade onda partícula. Apesar de sua simplicidade, o vídeo é bem explicativo e interessante, do ponto de vista de divulgação científica. Os alunos, após sua exibição, acharam muito estranho, ter os dois comportamentos envolvidos e, pela feição deles e dos comentários (“Mas como?”, “Que estranho...”), percebeu-se que se interessaram. Ao final ficou o questionamento: “A luz é onda ou partícula?” Porém os alertei sobre o fato do vídeo apresentar uma natureza “mística” do elétron e que isso pode levar à algumas interpretações equivocadas. Com o vídeo reproduzido, encerrei esse momento com o questionamento: a luz é uma onda ou uma partícula?

²⁵ Um erro que cometi nesse ponto, foi não ter prolongado a discussão. Pois percebi que se formaram dois grupos, onde um afirmava que haveria interferência entre as ondas e outro, que afirmava que não. Poderia ter aproveitado e gerado uma discussão entre toda turma sobre isso. Mas também, teve a questão do tempo, que me preocupou, pois as aulas do Professor Antônio Marcelo já estavam apertadas.

²⁶ Disponível em: <<https://youtu.be/zKiCEU6P3U0>>

4.5.2 Momento 2

De maneira bem expositiva, falei um pouco sobre Maurice de Broglie e também sobre seu irmão, Louis de Broglie. Para este último enfatizei um pouco mais, pois ele foi o responsável pela ideia de onda de matéria, que gerou um “rebuliço” na comunidade acadêmica e novamente, Einstein chamou todos para dar mais atenção a esta teoria. Expus sobre sua hipótese, de que um fóton era uma onda luminosa e também uma onda de matéria. Entre estes dois conceitos havia uma relação, que ficou conhecida como comprimento de onda de De Broglie. Desenvolvi com bastante calma as ideias associadas com essa relação, juntamente com os alunos. Houve mais questionamentos sobre a fórmula de momento e energia, mas fora isso, ficou claro para eles.

E para termos dados palpáveis para discutirmos, apresentei dois exemplos: de um chute de futebol para eles calcularem o comprimento de onda da bola e de um elétron com uma dada energia. Com estes exemplos, eles compreenderam porque a ideia de comprimento de onda de De Broglie parecia absurda, pois para fenômenos físicos cotidianos, os resultados eram ínfimos, imperceptíveis, sendo a diferença de escala muito grande. E para coisas muito pequenas, como um elétron, já era significativa.

Para encerrar esse momento, apresentei um pouco do trabalho de Louis de Broglie, falando sobre algumas das questões filosóficas que foram levantadas à época.

4.5.3 Momento 3

E no final, passei à eles o questionário da segunda parte da 4ª aula e o da 5ª aula.

No fim da aula, um aluno me questionou sobre a estrutura da placa metálica. Pois, se ao incidir uma luz sobre ela, elétrons são ejetados, o que acontece com os átomos internos desse material? Como não sabia responder de imediato,

informei que iria tirar essa dúvida com minha orientadora para responder a questão no próximo encontro.

4.5.4 Análise das Respostas ao Questionário

Segue as respostas sobre dualidade onda-partícula.

Questionário - 5ª Aula

1. Explique o fenômeno de Interferência. O que são as interferências construtivas e destrutivas? Dê exemplos.

A maioria dos alunos, discorrem de maneira clara sobre o que é o fenômeno de interferência e as características das interferências construtivas e destrutivas. Alguns dão exemplos e discutem como as variáveis de ondulatória se comportam nesse fenômeno. Seguem alguns exemplos de respostas:

“O fenômeno de interferência pode ser descrito como a ocorrência do encontro de duas ondas. São construtivas quando tendem a aumentar; resultam em uma maior. São destrutivas quando uma tende a anular a outra; resultam em uma menor ou nula. Ex.: quando duas pessoas agitam uma corda (exemplificado em sala).” (Aluno 13)

“É quando uma onda se sobrepõem a outra. Construtiva: a sobreposição de uma sobre outra formando uma onda maior. Destrutiva: quando elas tem a mesma frequência e se anulam.”
(Aluno 4)

2. Descreva o fenômeno da fenda dupla a partir das discussões realizadas na aula.

As respostas para essa questão, possuem a mesma característica que a anterior: clara. Dentre os 12 alunos presentes, um aluno cita esse fato como a prova para a mecânica quântica e pela sua resposta, parece ter visto esse conteúdo em algum documentário ou filme:

“Ela prova inequivocamente a mecânica quântica, de ondulatória. Na quântica, não existe o conceito de trajetória da partícula. Esta circunstância constitui o conteúdo (palavra desconhecida) chamado princípio da incerteza.” (Aluno 15)

Outros dois alunos citam a difração nesse fenômeno, porém, apesar de falarem sobre tal, suas respostas, no geral, não são diferentes dos demais, que é o comportamento dual da luz (muitos o chamam, de elétrons), ora partícula ora onda. Seguem alguns exemplos:

“A experiência das duas fendas consiste em deixar que a luz visível se difrate através das duas fendas.” (Aluno 10)

“No fenômeno obteve-se um comportamento do elétron que não era esperado. Teoricamente, o elétron deveria se comportar como partícula. O que realmente aconteceu: o elétron apresentou um comportamento igual ao de uma onda assim que passou pela fenda dupla. Daí surge a dualidade onda-partícula.” (Aluno 13)

“Demonstra que a matéria hora pode se comportar como partícula e hora como onda. O fenômeno consiste em jogar

bolinhas contra duas fendas, depois na água gerando ondas entre as duas e logo depois fótons.”(Aluno 3)

Apenas três alunos, pelas suas respostas, não conseguiram entender o experimento. E um deles, fez cópia do outro.

“Percebe-se que a luz é composta por ondas, pois ela passa pelas 2 fendas.” (Aluno 6)

“As duas fendas permite que a luz visível passa-se por elas, percebendo que a luz é composta por ondas.” (Aluno 5)

3. Em seu ensino médio ou fundamental, você já tinha ouvido falar ou já tinha estudado sobre a dualidade onda-partícula? Se sim, em que contexto este conteúdo foi desenvolvido? Se não, você julga importante haver tais discussões no ensino médio? Por quais motivos?

Nenhum aluno teve esse conteúdo em seu ensino médio, sendo visto pela primeira vez durante nossa aula. Alguns já tenham visto em documentários, livros, histórias ou em filmes, porém, em sala de aula, nunca discutiram esse tema. Um aluno não acha necessário que esse tema seja desenvolvido em sala de aula, pois conforme ele, o tema é muito abstrato e complexo:

“Não. Acho que não. Creio que o assunto seja um assunto que pode ser abordado com maior atenção na faculdade.” (Aluno 10)

“Acho que não, não me lembro. Não acho um assunto abstrato para quem ainda está no ensino médio, pois a física nas escolas é ensinada de maneira muito básica.” (Aluno 5)

Os demais, julgam importante o tema ser desenvolvido em sala, acham importante, por promover a física e fazer os alunos se interessarem pela física:

“Não. Acho que é importante sim, principalmente para que os jovens se interessem cada vez mais.” (Aluno 9)

“Não, seria muito importante para ter uma base na faculdade.” (Aluno 6)

“Não estudei e se a matéria foi passada, não foi ‘reforçada’. É importante para os nossos saberes interdisciplinares, uma curiosidade e para quem seguir a área da física já saber o básico.” (Aluno 3)

Um aluno acha necessário reformular a física dada nas escolas:

“Nunca tinha estudado, acho muito importante esse conteúdo no ensino médio, mais para isso acho que tem que reformular todo conteúdo de física nas escolas.” (Aluno 14)

4.5.5 Algumas Reflexões

Com relação às discussões sobre dualidade, foi uma aula simples e prática, pois podemos discutir diretamente o que é e suas controvérsias com a física clássica. Percebi que ondulatória, novamente, é um tema defasado por partes deles, pois muitos não conseguiram discutir sobre interferência construtiva e destrutiva, ao falarmos da situação das fendas. No final tive que falar brevemente o que seriam e como se aplicariam nas situações apresentadas. Mas, mesmo com essa defasagem, a discussão não estagnou. E o vídeo do Dr. Quantum, auxiliou muito a aula. O que

discutimos na lousa, desenhando e representando, o vídeo ilustrou de uma forma mais prática e visual para eles.

Ao falarmos sobre ondas de matéria, no qual tentamos encontrar a onda relacionada ao movimento de uma bola de futebol, percebi que mesmo sendo algo bem abstrato, participaram e discutiram muito os resultados. Além disso, senti que essa aula foi um auxílio para eles no conteúdo de ondulatória, ao tratarmos de comprimento de onda da matéria. Eles viram que um comprimento, que possui números na casa de 10^{-9} , não é algo razoável e visualmente perceptível.

No questionário dessa atividade, percebi que muitos responderam de maneira satisfatória as questões envolvendo interferências de onda, sendo que durante as aulas isso não ocorreu. Pode ter sido o fato de nós termos discutidos e desenvolvidos esses conceitos em sala, que tenha feito com que eles respondessem de maneira satisfatória essas questões. Com relação ao experimento, a maioria da turma compreendeu bem o que é, sem ser necessário correções e afins. Porém, a maioria²⁷, não teve contato algum com o tema dualidade. Muitos consideram importante essa discussão, pois chama a atenção dos estudantes e coloca, de forma prática, temas muitos abstratos, como o que seja uma onda, suas características e interferências entre elas. Acho que, apesar desse questionário ter ficado pequeno, ele cumpriu com os objetivos de aula e alcançou os resultados esperados.

4.6 Atividade 6 - Modelos Atômicos: Estabilidade e seus postulados

Essa atividade teve como objetivo geral discutir o desenvolvimento dos modelos atômicos, a partir de alguns problemas que surgiram quando se começou a entender a estrutura da matéria. Além disso, desejamos construir uma relação com os encontros anteriores de forma a justificar a visão atomística. Foi dado ênfase na forma como os modelos foram se desenvolvendo a partir de problemas encontra-

²⁷ Não digo todos, pois eles já devem ter visto algo sim mas não estejam relacionando com a aula ou não lembram.

dos nos modelos que o antecederam, de forma que o modelo estudado estivesse respondendo questões que o antecessor não era capaz.

Portanto, a presente aula se construiu a partir da discussão da estrutura matéria desde os gregos, até o século XX, relacionando com os temas das aulas anteriores.

De maneira análoga, esta aula está estruturada em três momentos específicos e foi planejada a partir dos seguintes objetivos de ensino:

- **Objetivos**
 - ★ Refletir sobre as atividades passadas e discutir o objetivo de se criar modelos na ciência;
 - ★ Apresentar e desenvolver os diferentes modelos atômicos.

O quadro (4.6) apresenta uma descrição da atividade 6.

Quadro 4.6 – Descrição da atividade 6, apresentando a duração prevista e uma breve descrição de cada etapa da atividade.

Momentos	Duração	Objetivos	Metodologia
I	30 min	Revisar os tópicos discutidos anteriormente. Discutir a evidência de que os átomos possuem elétrons, a partir da revisão.	Apresentação dialogada com discussões.
II	40 min	Discutir e desenvolver os modelos atômicos: desde Thomson até Bohr.	Desenvolver e discutir com o auxílio de data show, visando os equívocos e acertos de cada um.
III	30 min	Entender a relação entre as descobertas. Desenvolver a concepção de átomo.	Exposição dialogada.

4.6.1 Momento 1

²⁸ Antes de começar a presente atividade, conversei em particular com um aluno que no último encontro, questionou sobre a ejeção de elétrons.

Iniciei a aula apresentando e discutindo, de maneira expositiva, a evolução dos modelos atômicos, de forma a fazer com que os estudantes percebessem que todos eles são, em certo sentido, sucessões uns dos outros. Além disso, justifiquei a ascensão do atomismo, a partir de discussões dos temas anteriores.

No início da aula, fiz uma breve discussão com os alunos dos tópicos discutidos, desde o primeiro até o encontro anterior, e das problemáticas que surgiram ao longo das aulas. Evidenciei todos os encontros, destacando o Efeito Fotoelétrico, pois nele podemos perceber a ejeção de partículas de placas metálicas. E assim, conhecer os detalhes de sua composição e do que é formada, pode nos oferecer um entendimento mais razoável para o problema.

Levantei o seguinte questionamento aos estudantes: *"Se há essas evidências da existência de cargas negativas, outros problemas aparecem: de que maneira essas cargas negativas estão dispostas na matéria? Além disso, como é a forma estrutural da matéria?"* Assim, os problemas sobre a forma como esses elétrons estariam dispostos na matéria e a forma estrutural da matéria foram questões que surgiram com essas evidências. Sem muitos comentários ou questionamentos, passei para a primeira discussão.

De forma a construir uma analogia e criar uma atenção maior da turma, discuti com a turma o seguinte problema: *"Você possui uma barra de chocolate e suponha que você deseja dividi-la ao meio para sempre, em um processo infinito."* Perguntei ao grupo se essa divisão, em algum momento, cessaria e alguns alunos responderam que sim, pois a barra ficaria tão pequena que não seria mais possível fazer a divisão. Evidentemente que a turma se manifestou de forma a concordar que há um ponto em que não é possível mais dividir esse chocolate, pois chegaremos em um ponto em que teremos um pedaço ínfimo de chocolate. E eu concordei. Afinal, não temos capacidade de fazer essa divisão de fato. Porém, indo além, indaguei: imaginemos que temos um artefato que consiga realizar essa divisão microscopicamente e relancei o questionamento, se mesmo assim a divi-

são sera ininterrupta. A ideia é que com essa discussão, os alunos conseguissem refletir se há um limite para a matéria, aquele momento em que não podemos mais dividir de fato, ou seja, a parte mínima da matéria, que a princípio, determinaremos como sendo o átomo²⁹.

A turma ficou em silêncio e percebendo que eles não iriam interagir, falei sobre o paradoxo de Zenão³⁰ chamando a atenção de alguns para a discussão³¹. Além disso, por mais que não estivesse planejado falar sobre esse paradoxo, no momento me veio em mente como forma de relacionar o problema da divisão do chocolate.

4.6.2 Momento 2

Dei sequência a atividade e apresentei à eles as possíveis primeiras pessoas (pelo que sabemos) a discutirem sobre a estrutura da matéria em si: Leucipo e Demócrito. Leucipo apresentou a ideia de que a matéria é feita de partículas indivisíveis, o que apresentou o nome átomo. Expliquei aos alunos que a palavra átomo é grega e significa: *a=não, tomo=divisão*. E que Demócrito apresentava a ideia que há apenas átomos e vazios. Aqui, questionei aos estudantes, através das definições, que tínhamos um detalhe muito importante, que sabemos que há até hoje e que é algo que chama a atenção de todos, porém nenhum aluno percebeu: a ideia da matéria possuir vazios! Nesse ponto em questão, é muito importante chamar a atenção dos alunos para o fato de que, este pensador pensou em espaço vazio dentro da matéria, o que hoje é conhecido. Ou seja, um fato bem atual mas que naquela época, era extremamente ousado. Porém, deixei claro aos alunos que os

²⁹ Aqui não entraremos na discussão das partículas elementares.

³⁰ Nesse momento, o professor Antônio Marcelo me auxiliou pois percebeu que a turma estava estática, sem interação.

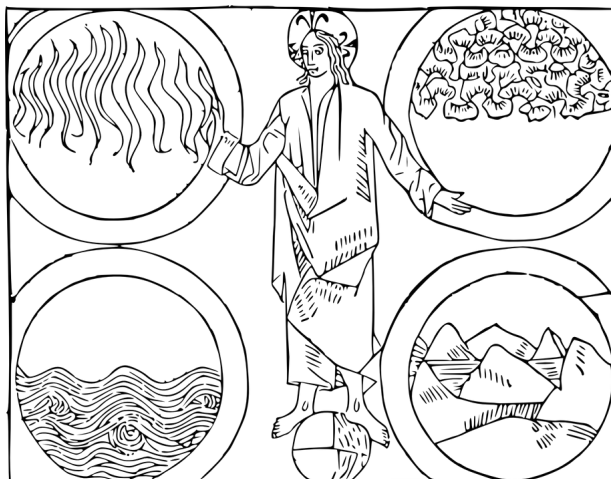
³¹ O paradoxo de Zenão é um problema no qual temos uma corrida entre Aquiles e uma tartaruga. Esta sai na frente, devido à sua desvantagem e Aquiles posteriormente. O paradoxo nos diz que Aquiles jamais passará a tartaruga. De fato, segundo o raciocínio de Zenão, quando Aquiles chegar ao ponto no qual a tartaruga gastou para partir, a tartaruga já estará em outro ponto; e quando Aquiles chegar ao outro ponto, a tartaruga já estará em; e assim por diante, indefinidamente, um processo que não termina.

pensadores eram de épocas diferentes e de escolas diferentes, ou seja, vieram de tempos e filosofias diferentes.

Apesar de serem de épocas diferentes e filosofias diferentes, discuti com os alunos que os pensadores sofreram ataques e pressões dos outros pensadores e da sociedade em si, pois suas ideias fugiam do materialismo, tirando a ideia de um criador e colocando em dúvida, a mitologia e toda a “mística” em volta da vida. Fora isso, suas ideias passavam uma imagem mais racional da criação, o que abriu “brechas” para ataques de teólogos e metafísicos da época.

Dando sequência, discuti com os alunos que a explicação mais aceita foi a de Aristóteles, em que tudo que existe nada mais é do que a composição dos 4 elementos: água, ar, fogo e terra. Então, tudo à nossa volta era uma composição deles. A figura (4.8) ilustra os quatro elementos de Aristóteles.

Figura 4.8 – Os quatro elementos da natureza segundo Aristóteles.



Fonte: Elementos: Terra, ar água e fogo. Disponível em: <https://pixabay.com/pt/vectors/elementos-terra-ar-%C3%A1gua-fogo-35448/>. Acesso em 25 de ago. de 2018

Com isso, questionei aos alunos quando novamente a sociedade volta seus olhares para a composição da matéria. Instiguei-os de maneira que eles percebes-

sem que ficamos muito tempo sem debater isso e que a questão voltou muitos anos depois.

Continuei questionando aos sobre quando teria sido a retomada dessas discussões. A turma ficou em silêncio e apresentei para eles então o artigo de Dalton³², sobre a absorção de gases pela água e outros líquidos. Nesse momento, o professor Antônio Marcelo entrevistou e explicou que dentro desse “gap”, discutiu-se sim, de certa forma, a composição da matéria, pois se pegarmos a cronologia percebemos que há momentos importantes da história em que houve revoluções tecnológicas e científicas, tais como: idade média, os alquimistas e as revoluções industriais. Então, ele ressaltou que temos que tomar cuidado quando se fala no desenvolvimento da forma de interpretação da estrutura da matéria, pois o que temos em mente é que depois dos gregos, a humanidade não desenvolveu mais nada em relação à isso e que até o início do século XX, acreditávamos que tudo era composição de água, ar, fogo e terra, o que não é verdade.

Agradei sua intervenção e dei sequência, falando sobre a ideia do modelo que Dalton desenvolveu, conhecida como “Bola de Bilhar”. O modelo nos diz que o átomo é como se fosse uma esfera maciça e impenetrável e sem carga. Porém, esse modelo não condizia com o que já vínhamos discutido, pois se não há cargas, os fenômenos que visualizamos não seriam percebidos e também, o experimento da ampola de Crookes demonstrava evidências da existência de cargas elétricas no átomo. Assim, veio o modelo de Thomson em que ele tenta solucionar esse problema com as cargas elétricas, em que as cargas elétricas estariam dispostas ao longo do átomo. Só que o modelo que desenhei não estava correto, e o professor Antônio Marcelo entrevistou, de forma que as cargas negativas estão localizadas no interior de uma distribuição esférica de cargas positivas. Portanto, como já era conhecido da época, em que cargas de sinais contrários se repelem, as cargas ne-

³² On the absorption of gases by water and other liquids. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786440608563325>.Acessoem04deout.de2018>

gativas estariam dispostas de maneira uniforme nessa esfera de carga positiva, e não aleatoriamente como representei.

Porém, tempos depois, um experimento, o da ampola de Crookes, nos mostraria que esse modelo não seria capaz de explicar a matéria, pois haviam evidências que a matéria possuía cargas elétricas opostas. Essa ampola era composta de vidro (ou quartzo) e dentro dela se cria um vácuo. Lá dentro contém duas placas metálicas ligadas a uma fonte de tensão elétrica. A placa ligada ao pólo negativo é chamada de catodo e a outra, ligada ao pólo positivo, é o anodo. Assim, quando se cria uma tensão entre o catodo e o anodo bem elevada surge um feixe luminoso que sai do catodo e atravessa o tubo, o qual levou o nome de raios catódicos. Esses experimentos e tais evidências fizeram Thomson concluir que os raios eram na verdade um feixe de partículas carregadas negativamente. Porém, o modelo de Dalton não condizia com essas evidências experimentais, pois se não há cargas, os fenômenos que visualizamos não seriam percebidos. Assim, além de ter descoberto o elétron através desse experimento, veio o modelo de Thomson, que se baseou no experimento supracitado, o qual tenta solucionar esse problema com cargas elétricas. Portanto, o modelo de Thomson representava que as cargas elétricas estariam dispostas ao longo do átomo. Assim, o modelo era de tal forma que as cargas negativas estão localizadas no interior e na superfície de uma distribuição esférica de cargas positivas, no qual as cargas negativas estariam dispostas de maneira uniforme nessa esfera de carga positiva, pois cargas de sinais contrários se repelem.

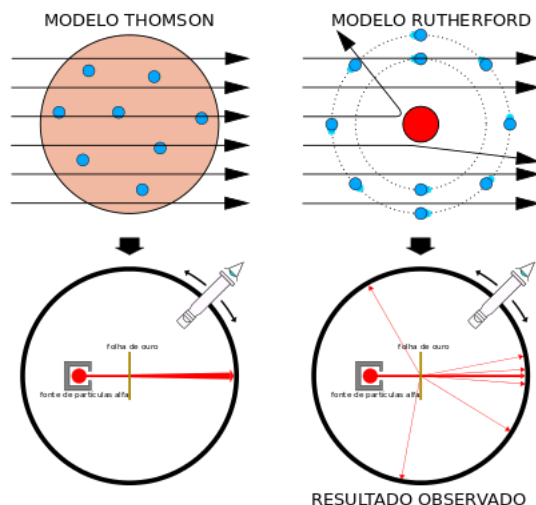
Um ano depois, seu aluno Ernest Rutherford, verificaria que o modelo de seu tutor não respondia uma evidência experimental: espalhamento de partículas α . O que Rutherford contestou é que a carga positiva está concentrada no centro no átomo, e não espalhada pela matéria, e isso foi um passo muito importante para a física e a ciência em si, visto que pela primeira vez estamos falando de um núcleo.

E continuei a discussão com a turma de que um experimento posterior a este desenvolvimento, levaria ao desenvolvimento de outro modelo, o Modelo de Rutherford. O experimento deixava evidências que as cargas positivas não poderiam estar espalhada pelo átomo e sim, concentrada em uma região muito pequena. Isso foi um “gancho” para apresentar a eles um dos momentos mais importantes do atomismo que foi a ideia do núcleo. E mostrei para os alunos como o experimento funcionava, usando o experimento do PhET³³ e percebi que muitos acompanharam a demonstração, porém sem nenhuma questão levantada. Creio que muitos tenham visto esse modelo durante o ensino médio, pois é um dos mais conhecidos, sendo antecessor do modelo de Bohr.

O experimento consistia em uma fonte radioativa, cujo feixe seria colimado por dois diafragmas, e essas partículas incidiriam sobre uma folha de um metal, no caso ele usou ouro, e do lado oposto havia uma tela de sulfato de zinco. Essa tela emitiria um flash quando fosse atingida por uma partícula alfa. Nesse experimento, Rutherford teve a ajuda de dois alunos de doutorado: Geiger e Marsden. Portanto, o que os dados do experimento mostraram é que o modelo de Thomson possuía imprecisões, pois eles perceberam que alguns flashes não estavam na mesma linha que o feixe colimado. Ou seja, o feixe incidente era deflexionado com um certo ângulo, o que não era esperado! Pelo Modelo atômico de Thomson, todas as partículas alfa deveriam atravessar a chapa de ouro e isso não foi observado. A figura (4.9) mostra o que se esperava e o que se observou a partir do espalhamento das partículas alfa.

³³ Rutherford-scattering. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/rutherford-scattering

Figura 4.9 – Expectativas e resultados da experiência do espalhamento de partículas alfa.



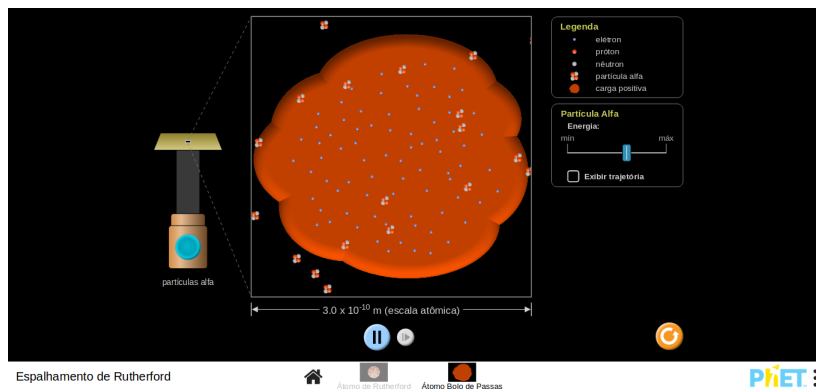
Fonte: Experimento de Geiger-Marsden. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Geiger-Marsden. Acesso em 04 de set. de 2018

A partir desses resultados, Rutherford propôs um modelo atômico no qual o átomo consistia em um núcleo, carregado positivamente, e que estaria rodeado por elétrons. Lembrando que esse modelo foi baseado em suas evidências experimentais.

Para uma compreensão melhor dessas evidências, usamos o simulador PhET: *Rutherford scattering*³⁴ (vide figuras 4.10, 4.11 e 4.12) e a partir dele, discutimos com os alunos as justificativas, por exemplo, de se usar a folha de ouro.

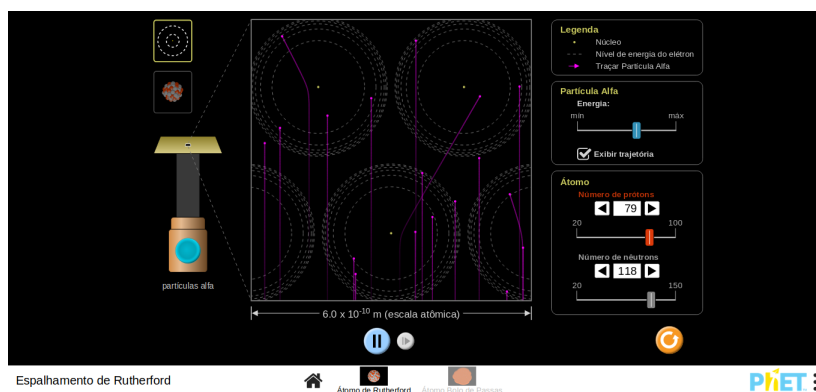
³⁴ Rutherford-scattering. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/rutherford-scattering>>

Figura 4.10 – O esperado para o modelo de "bolo de passas".



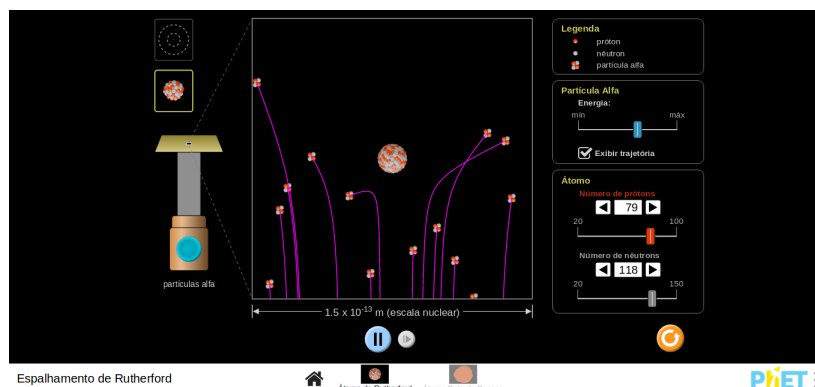
Fonte: Espalhamento de Rutherford. Disponível em: https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering_pt_BR.html. Acesso em 25 de mai. de 2018

Figura 4.11 – O experimento para o modelo de Rutherford.



Fonte: Espalhamento de Rutherford. Disponível em: https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering_pt_BR.html. Acesso em 25 de mai. de 2018

Figura 4.12 – O experimento para o modelo de Rutherford, porém analisado através de seu núcleo, no qual há a concentração de carga positiva.



Fonte: Espalhamento de Rutherford. Disponível em: https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering_pt_BR.html. Acesso em 25 de mai. de 2018

Apesar de parecer incontestável e de ter possibilitado grandes avanços e descobertas na física, o modelo que Rutherford propôs apresentava um problema de estabilidade sério. Questionei os alunos se eles conseguiam perceber algum problema nesse modelo, pois há cargas negativas girando em torno de cargas positivas. Instiguei-os a perceber que isso não é tão trivial e de que, pelos conhecimentos básicos de eletrostática, essa proposta não será estável. Questionei novamente os alunos se estaria correto e se sim, era possível a realidade que conhecemos. Muitos responderam que não, pois mudaria toda concepção e com certeza não existiria nada, pois a matéria entraria em colapso.

O problema que o modelo de Rutherford apresentava, era referente a sua estabilidade atômica. Pela teoria do eletromagnetismo, quando temos cargas carregadas em movimento acelerado, elas emitem radiação, ou seja, energia. Assim, no caso do modelo de Rutherford, os elétrons, que estão girando em torno de um núcleo positivo, perderão energia e se moveriam em uma órbita, e em algum momento se chocariam com o núcleo. Portanto, isso não condiz com a realidade.

E, para resolver esse problema, apresentei aos estudantes os postulados de Bohr. E novamente, questionei eles o que são postulados, mas de maneira diferente, conseguiram responder. Apresentei esses postulados aos alunos, de maneira que estejam resolvendo os problemas apresentados no modelo anterior, do Rutherford. Também, discuti com eles a presença, novamente, da constante de Planck h nos postulados. Porém, construí com eles a ideia de que Bohr misturou duas concepções bem diferentes, a física clássica e a não clássica, pois quantizou o momento angular e o elétron, ao mudar de camada, necessita de uma energia

De maneira a resolver esse problema, Niels Bohr desenvolveu quatro postulados e os apresentei à turma, de forma a “resolver” esse problema, que são:

1. *“Um elétron se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob influência da atração coulombiana entre o elétron e o núcleo, obedecendo as leis da mecânica clássica.”;*
2. *“Em vez da infinidade de órbitas que seriam possíveis segundo a mecânica clássica, um elétron só pode se mover em uma órbita na qual seu momento angular orbital L é um múltiplo inteiro de $h/2$.”;*
3. *“Apesar de estar constantemente acelerado, um elétron que se move em uma dessas órbitas possíveis não emite radiação eletromagnética. Portanto, sua energia total E permanece constante.”;*
4. *“É emitida radiação eletromagnética se um elétron, que se move inicialmente sobre uma órbita de energia total E_i , muda seu movimento descontinuamente de forma a se mover em uma órbita de energia total E_f . A frequência da radiação emitida ν é igual à $E_i - E_f$ dividida por h .”*

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h} \quad (4.5)$$

Ao apresentar os postulados discuti cada detalhe com eles, inclusive a aparição da constante de Planck. Mas deixei claro que apesar do modelo resolver em partes os problemas da estabilidade, Bohr misturou duas concepções bem diferentes, que é a física clássica e não clássica, além de estar quantizando o momento angular. Fora isso, também temos que o elétron, ao mudar de camada, necessita de uma energia semelhante ao discutido por nós em encontros anteriores

$$\Delta E = h\nu \quad (4.6)$$

e a questão volta a tona novamente, se a constante de Planck possui significado físico.

4.6.3 Momento 3

Por fim, apresentei o vídeo: Just how small is an atom³⁵ (Quão pequeno é um átomo). É um vídeo curto que levanta discussões e questionamentos muito interessantes acerca do espaço vazio na matéria e como o átomo é denso. Os alunos consideraram que o vídeo possui muita informação em pouco tempo, mas que é algo complementar.

E para encerrar, os questioneei sobre o que acharam do mini-curso e se era possível usá-lo em sala de aula. A maioria respondeu que é possível sim, porém seria melhor aplicá-lo em uma turma do terceiro ano, isso porque alguns vão estudar ótica ou modelos atômicos em anos diferentes. Alguns gostaram muito do curso, principalmente na parte referente a luz, pois as discussões foram bem diferentes as vistas até agora, fora que ficaram intrigados com alguns pontos, que futuramente irão estudar nas matérias do curso.

³⁵ Just how small is an atom. Disponível: https://www.ted.com/talks/just_how_small_is_an_atom.

4.6.4 Algumas Reflexões

A primeira crítica a se fazer sobre esse encontro é a ausência do desenvolvimento ou construção de alguma atividade para os alunos realizarem, na qual poderia ter sido feito um questionário, atividade experimental ou uma atividade em grupos. Além de não ser possível uma leitura mais apurada do processo de ensino aprendizagem dessa aula, não há também como dizer empiricamente se ela foi satisfatória ou não. Portanto, me basearei apenas nos relatos e nas discussões vivenciadas em salas.

Começando pela problemática, que foi o questionamento acerca das justificativas das discussões das aulas passadas, creio que foi satisfatória e razoável, pois percebi que os alunos conseguiram fazer a relação dessa aula com as demais, não ficando algo separado e fora do contexto. Assim, apenas essa problematização e motivação para os momentos posteriores são suficientes.

Para começar a discutir sobre a estrutura da matéria e toda sua composição, quando voltamos aos gregos: Leucipo e Demócrito, o momento em si foi bom. Porém, percebi que ficou muito expositiva, sem diálogos e discussão por parte dos alunos, e, novamente, fica difícil dizer se o momento cumpriu seu objetivo. Portanto, aqui requer modificações, colocando o aluno a participar e ser parte da construção do respectivo momento.

Na sequência, ao fazer a "ponte" entre os gregos e os modelos atômicos, ficou um espaço cronológico muito grande, o qual coloquei como se não houvesse discussão alguma sobre estrutura da matéria e sua composição e isso foi discutido e "corrigido" pelo professor Antônio Marcelo com os alunos e comigo próprio. Portanto, aqui requer um pouco de cuidado ao fazer essa relação, pois a ideia que temos é que tais discussões ficaram anos engavetadas sem serem analisadas e debatidas, só que isso não pode ser verdade, ao se analisar a própria história. E aqui, entra um ponto um pouco complicado e delicado, pois há poucos materiais sobre essa temática e há a necessidade de analisar e avaliar se tal material é confiável.

Por exemplo, temos a alquimia, que atuou em diversas regiões do mundo ao longo da idade média, só que ao pesquisar sobre e ao analisar o próprio livro didático, os materiais no remetem à apenas às pesquisas e os cientistas da Europa. Além disso, há também o período fora da idade média e as construções e desenvolvimentos de outras nações e regiões fora da Europa. Então, nesse momento é necessário reavaliar essa discussão e desenvolver uma relação mais enraizada, entre os gregos e os modelos atômicos.

As discussões sobre os modelos atômicos, foram bem bacanas! Mas no primeiro modelo, de Thomson, o desenho que fiz no slide nos remeteu a uma ideia errada do modelo, porém o professor Antônio Marcelo corrigiu e um outro aluno percebeu o erro. Nos demais, não houve nenhum equívoco semelhante. A análise que tenho desse momento, das discussões e construções dos modelos atômicos é semelhante a anterior, que é a ausência do desenvolvimento de algo por parte dos alunos. Reconheço que o tempo não é favorável, mas poderia repensar esse momento e tentar encaixar algo nele, que permita aos alunos criar algum material ou desenvolver alguma atividade. O que pensei, após a aula, por exemplo, é os alunos se dividirem em grupos e cada um ficaria responsável por um modelo e por um momento na história. Nisso, deveriam apresentar o modelo aos demais colegas e o seu respectivo sucessor, avaliar e encontrar a problemática envolta daquele modelo. Além deles participarem mais, fixaria a atenção de todos e as discussões seriam mais ricas, ao tentarem justificar a veracidade de seus modelos.

O modelo de Rutherford não apresentou nenhum tipo de problema e os alunos discutiram bastante sobre, inclusive ao abrir o PhET e iniciarmos a simulação. Porém, no modelo de Bohr não ocorreu o mesmo, sendo que ficou bem expositivo. Por isso, reforço a ideia dada no parágrafo anterior. E por fim, o vídeo final que passei, foi bem interessante, pois levantou questões sobre a matéria, como o espaço vazio e sua alta densidade, sendo que, a única crítica apresentada é que é um vídeo curto para as informações apresentadas. E aqui, mesmo com

os problemas encontrados, os alunos relacionaram e identificaram o espaço vazio citado por Leucipo, muitos anos atrás, e que hoje é confirmado. Além disso, foi possível apresentar a eles, as outras partículas, no qual não houve espaço e momento na aula para falar sobre. No *feedback* os alunos disseram que seria uma boa ideia levar essas aulas para o ensino médio e que gostaram, só que fariam modificações pois apresentam informações que eles não tiveram contato, principalmente temas de ondulatória e óptica. Disseram também que foi interessante essa introdução no curso, pois o contato com física moderna e contemporânea é bem escasso e acontece apenas do meio ao final do curso de física.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foi possível perceber que, além de ter sido uma oportunidade para aprimorar minha formação inicial, devido ao estudo aprofundado sobre diversos temas de Física Moderna e Contemporânea (FMC), que são vistos em duas disciplinas do curso de Licenciatura em Física, ele também permitiu que eu fizesse uma reflexão sobre o desenvolvimento desses temas dentro de salas de aula do Ensino Médio. Como trabalhamos com estudantes do início do curso de graduação na Licenciatura em Física, foi possível verificar que os conteúdos de FMC e, de maneira geral, ficam de fora das discussões realizadas durante a formação na educação básica.

O estudo dos tópicos de FMC, para o desenvolvimento dessas atividades, foram realizados de forma a não refletir sobre como ensiná-los ou repassar esses conhecimentos. Isso pode ser visto no capítulo de Ondas Eletromagnéticas, no qual possui o objetivo de ser um material de estudo complementar aos estudantes e professores, porém, sem a preocupação de ser discutido e desenvolvido, de uma forma mais didática.

Outra reflexão persistente que o trabalho traz à tona, é como a relação entre física, sociedade e história estão interligadas, permitindo uma boa contextualização para as discussões e desenvolvimento dos temas. Devemos ressaltar que é preciso ter cautela ao tentar fazer essa relação, pois ao usar história podemos cair no mito dos gênios da física e nos relatos que romantizam ciência, tais como: maçã de Newton¹, densidade e Arquimedes² e os problemas de Galileu com a igreja³. Um outro ponto importante diz respeito a neutralidade da ciência, dando a entender que ela se desenvolveu por livre e espontânea vontade, sem interferência política ou cultural, sem as influências da sociedade. Essa reflexão nos faz considerar em ampliar essas discussões nas atividades, discutindo o desenvolvimento

¹ Para maiores detalhes, consulte: (A. . . , 2006)

² Para maiores detalhes, consulte: (MARTINS, 2000)

³ Para maiores detalhes, consulte: (MEDEIROS, 2010)

delas, baseado em trabalho sucessivos e, além disso, discutir a relação deles com o momento cultural, social e político.

Infelizmente, como discutido na atividade sobre Radiação de Corpo Negro 4.3, foi cometido um erro histórico quando falamos que Planck fez uma correção na relação de Rayleigh-Jeans. Na verdade, a relação de Rayleigh-Jeans veio depois da relação encontrada de Planck. Além disso, durante a discussão desenvolvida, transpareceu que Max Planck teve um toque de genialidade ao propor sua relação, o que não condiz com o trabalho que está sendo feito à época.

A mesma crítica vale para a discussão sobre o contexto histórico no qual se desenvolveu a proposição dos modelos atômicos. O *gap* entre a época dos gregos e até final do século XIX, deu a entender que não houve nenhuma discussão sobre composição e estrutura da matéria antes disso, o que não é verdade⁴. Portanto, isso nos alerta para o fato de que temos que cautela ao discutir a ciência lembrando sempre de que as teorias e descobertas científicas são trabalhos desenvolvidos por muitas mãos e mentes.

Ao término do minicurso notamos a grande curiosidade que os estudantes manifestaram pelos temas, querendo compreender mais e aprofundarem-se em alguns conceitos físicos e análises, tanto quantitativas como qualitativas. Além disso, foi possível perceber que alguns estudantes possuíam ideias iniciais sobre os conceitos abordados, devido ao contato com documentários, livros ou artigos de revistas e jornais, fora o vasto acervo presente na internet, que facilita o contato deles com os tópicos, sem ficarem restritos ao curso de graduação.

Apesar de, em alguns casos, os conhecimentos identificados com pré-requisitos facilitarem a aplicação e o desenvolvimento das atividades, percebemos há a necessidade de se planejar um tempo maior para algumas delas, tais como a discussão sobre intensidade de uma onda e campos elétrico e magnético. Esses conceitos são necessários a discussão sobre radiação do corpo negro e do aparato

⁴ Para maiores informações, consulte Peduzzi (2008, cap. 1)

experimental do efeito fotoelétrico. Porém, apesar disso, foi possível realizar o desenvolvimento desta atividade, pois as discussões são introdutórias, sendo possível discutir-se conceitualmente estes tópicos.

Percebeu-se também que em todos os encontros envolvendo a maioria dos conceitos de termodinâmica, ondulatória e eletricidade, houve a necessidade de se aprofundar esses conceitos da Física Clássica. Assim, há a necessidade dos Estudantes possuírem alguns pré-requisitos e dentro deles podemos citar um exemplo: o entendimento do funcionamento de um circuito elétrico fundamental para interpretar o experimento da ampola de Crookes, no qual é necessário ter compreensão sobre as definições de corrente e tensão. Na mesma linha, o aparato experimental do efeito fotoelétrico, requer esses também, além de campo elétrico e algumas discussões sobre a condutividade do material. Mas, mesmo com essas dificuldades por causa da ausência desses conhecimentos iniciais, foi possível desenvolver todas as atividades planejadas, pois mesmo alguns temas sendo novidades para eles, inclusive a grandeza física campo, e outros defasados, as discussões e o desenvolvimento ficaram sendo qualitativas, sem entrar em detalhes quantitativos destes. Além disso, pode-se fazer uso de ilustrações, slides ou vídeos para tal, o que não traz dificuldades para os alunos entenderem esses conceitos.

Dentro dessa mesma discussão, podemos considerar a inserção desses temas dentro das discussões da física clássica. Como por exemplo, na primeira atividade, pode-se fazer uma reflexão sobre os limites da mecânica, corpos usuais em alta velocidade e corpos de escala microscópica em velocidades usuais. Pode-se também fazer uma relação entre energia e ondulatória, no segundo ano do ensino médio, no qual se desenvolve os principais tópicos: comprimento de onda, frequência, calor, temperatura e as propriedades dos materiais. Há também uma outra proposta, nesse caso para o último ano do ensino médio, o terceiro, no qual pode-se desenvolver os principais tópicos de eletrostática e eletrodinâmica com

o aparato experimental do efeito fotoelétrico, e, de maneira sequencial, discutir sobre o campo elétrico.

As atividades, da maneira exposta no presente trabalho, aparenta ser uma sequência a ser seguida. Na verdade, a intenção inicialmente era de que todas elas se completassem, de maneira que os conceitos fossem sendo desenvolvido ao longo dos encontros. Porém, no desenvolvimento delas, tomamos um outro caminho, pensando no objetivo que era a investigação dos pré-requisitos, e, assim, as atividades foram construídas de maneira a serem aplicadas individualmente, com exceção das atividades 2 e 3, que são sequenciais e complementares. Então, as demais podem ser aplicadas sem a necessidade das anteriores.

Por fim, foi possível perceber o entusiasmo dos estudantes ao discutir os vários temas, pois como relatado, eles irão ter contato com eles somente em seus períodos finais. A atividade possibilitou que eles pudessem contemplar de forma mais introdutória esses temas e conhecerem a relevância da apropriação de vários conceitos físicos para suas formações.

REFERÊNCIAS

A MAÇÃ DE NEWTON: HISTÓRIA, LENDAS E TOLICES. In: ESTUDOS DE HISTÓRIA E FILOSOFIA DAS CIÊNCIAS. São Paulo: [s.n.], 2006. Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/server/pdf/RAM-livro-Cibelle-Newton.pdf>>. Acesso em: 23 nov. de 2019.

ALONSO, M.; FINN, E. J. **Física: um curso universitário, vol. 2**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1972.

ALSOP, M. W. S. High school students understanding of radiation and environment: Can museums play a role? Canadá, p. 132–138, 2000.

ARRIBAS, S. D. **Experiências de Física na Escola**. 4. ed. Passo Fundo: Ed. Universitária, 1996.

BARDIN, L. Análise de conteúdo. Edições 70, Lisboa, 1977.

BARRETO, R. G. **Ser protagonista língua portuguesa**. 3. ed. São Paulo: Edições SM editora responsável Andressa Munique Paiva, 2016.

CHASSOT, A. **A ciência através dos tempos**. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2004.

CHESMAN, C.; CARLOS, A.; AUGUSTO, M. **Física Moderna: Experimental e aplicada**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

DAMIANI, M. F. Entendendo o trabalho colaborativo em educação e revelando seus benefícios. **Educ. Rev.**, n. 31, p. 213–230, jan 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-40602008000100013&lng=en&nrm=iso>.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A. P. **Metodologia do Ensino de Ciências**. São Paulo: Cortez, 1990.

EISBERG, R. **Física Quântica**. 29ª reimpressão. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979.

FILGUEIRAS, C. A. L. Duzentos anos da teoria atômica de dalton. **Química Nova Escola**, v. 2, n. 20, p. 38–44, nov 2004. Disponível em: <->.

HENRIKSEN, D. J. E. K. Facts and feelings: exploring the affective domain in the learning of physics. Norway, p. 1–18, 2001.

MARTINS, R. A. Física e história. **Ciência e Cultura**, v. 57, n. 3, jul-set 2005. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_issuetoc&pid=0009-672520050003&lng=pt&nrm=iso>.

MARTINS, R. de A. Arquimedes e a coroa do rei: problemas históricos. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, n. 2, p. 115–121, ago 2000. Disponível em: <->.

MEDEIROS, A. C. L. Miguel de A. Contextualizando a abordagem de radiações no ensino de química. **Rev. Ensaio.**, n. 03, p. 65–84, set-dez 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-21172010000300065&lng=en&nrm=iso>.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor**. 4ª, 1ª reimpressão. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2004.

PEDUZZI, L. O. d. Q. **Evolução dos conceitos na física: do átomo grego ao átomo de Bohr**. Florianópolis: UFSC, 2008.

SHENK, A. **Cálculo e geometria analítica**. Rio de Janeiro: Campus, 1988.

SILVA, J. L. G. Maria Cristina Amaral da. A segunda revoluçÃo industrial e suas influências sobre a educaçÃo escolar brasileira. Campinas, Brasil, 2006.

SILVA, R. M. **Sequência Didática multimídia para o ensino do efeito fotoelétrico**. Dissertação (Mestrado) — UFF, 2015.

WALKER, J. **Halliday/Resnick - Fundamentos de Física, vol.2**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.