



INSERÇÃO DOS CONCEITOS DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO NO ENSINO MÉDIO ATRAVÉS DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA BASEADA EM UMA UEPS

ALDERICO DOS SANTOS SOUSA FILHO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Amazonas e Instituto Federal do Amazonas no Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:
Prof. Dr. Jose Ricardo de Sousa (UFAM)

Manaus-AM
Setembro de 2018

INSERÇÃO DOS CONCEITOS DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO NO ENSINO MÉDIO ATRAVÉS DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA BASEADA EM UMA UEPS

ALDERICO DOS SANTOS SOUSA FILHO

Orientador:
Prof. Dr. Jose Ricardo de Sousa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Amazonas e Instituto Federal do Amazonas no Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Prof. Dr. José Ricardo de Sousa – UFAM
(orientador)

Prof. Dr. Alberto Sebastião de Arruda – UFMT
(Membro)

Prof. Dr. Wagner Antônio da Silva Nunes – IFAM
(Membro)

Manaus-AM
Setembro de 2018

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a meu pai (in memoriam) e a minha mãe os quais tenho grande admiração e sem os seus esforços e ensinamentos eu não chegaria até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela obra da criação e pelo seu amor imensurável.

A minha esposa Kettyn pela paciência e entendimento da minha ausência durante esses anos de mestrado e aos meus filhos Dom Victor e Sophia por serem amorosos comigo e fazerem a alegria da casa.

Aos meus irmãos Myke e Andréa que sempre acreditaram e confiaram no meu potencial, apesar de estarmos distantes geograficamente.

Ao meu colega de trabalho Fonseca por ter ajudado e contribuído me substituindo no trabalho nas minhas ausências nas sextas-feiras para que eu pudesse frequentar as aulas do mestrado.

Ao meu orientador Prof. Jose Ricardo de Sousa pela orientação e também pela dedicação e empenho ao programa de mestrado Polo UFAM/IFAM do qual foi coordenador.

Aos meus colegas da turma de mestrado, em especial Sidomar Pirrony, José Francisco (Xyco), Rodrigo Araujo, Isac Pereira, Glauber Siqueira pela união, amizade que fizemos e por fazerem dos momentos sofridos (estudos) momentos de alegria e descontração.

Aos professores do programa, por todo o conhecimento e experiência transmitidos nas disciplinas.

A SBF, MNPEF e UFAM/IFAM, que proporcionaram o mestrado na nossa região.

RESUMO

INSERÇÃO DOS CONCEITOS DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO NO ENSINO MÉDIO ATRAVÉS DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA BASEADA EM UMA UEPS

Alderico dos Santos Sousa Filho

Orientador:

Prof. Dr. Jose Ricardo de Sousa

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Amazonas e Instituto Federal do Amazonas no Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

A dissertação apresenta o desenvolvimento de uma Sequência Didática (SD) baseada nos passos de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) e fundamentada na teoria da Aprendizagem Significativa com o objetivo de inserir os conceitos da Radiação do Corpo Negro no Ensino Médio. Esse é um tema alicerçado na Física Moderna e Contemporânea (FMC) o qual é fundamental para o entendimento da tecnologia atual. As pesquisas já mostram que não é de agora o interesse pelo ensino da FMC, mas parece que a Física ensinada nas escolas atualmente não passa do século XIX. A FMC é cobrada nos quatorze livros adotados pelo Programa Nacional do Livro Paradidático (PNLD 2015), porém, certos temas como é o caso da Radiação do Corpo Negro se apresenta em alguns livros do PNLD. Para auxiliar o professor em sala de aula foi desenvolvida a SD como estratégia de ensino e o resultado é o Produto Educacional como material didático. Na produção do material, utilizou-se a metodologia de pesquisa qualitativa e na coleta de dados os registros do diário de campo do professor, observação e atividades realizadas pelos alunos. A SD desenvolvida foi aplicada com os estudantes do terceiro ano do Ensino Médio da Escola Estadual de Tempo Integral Senador Petrônio Portela, localizada na zona Centro-Oeste de Manaus-AM.

Palavras-chave: Radiação do Corpo Negro, Sequência Didática, UEPS, Aprendizagem Significativa.

Manaus-AM
Setembro de 2018

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa Conceitual do conteúdo da Radiação do Corpo Negro construído com o software Cmap Tools	16
Figura 2 – Cavityde ressonante que se comporta como um corpo negro ideal	20
Figura 3 – Espectro da radiação de um corpo negro na temperatura de 1500K (pontos), e comparamos com as curvas teóricas da teoria de Planck (linha contínua), lei de Wien (linha tracejada) e lei de Rayleigh-Jeans (linha pontilhada).....	22
Figura 4 – Densidade de energia espectral $u(\lambda, T)$, em função do comprimento de onda λ , da radiação de um corpo negro para diversos valores de temperatura	23
Figura 5 – Calor específico da rede mediante os modelos de Einstein e de Debye, com dados experimentais para Al e Cu	39
Figura 6 – Imagem da tela do vídeo utilizado na Situação problema inicial	45
Figura 7 – Os alunos construindo o mapa conceitual referente ao vídeo e texto da situação problema inicial	46
Figura 8 – Imagem da tela do simulador PhET	48
Figura 9 – Alunos no laboratório de informática aprofundando o conhecimento sobre a Radiação do Corpo Negro com o uso do simulador PhET	49
Figura 10 – Imagem da tela do vídeo utilizado na Aula integradora final	50
Figura 11 – Mapa conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelos alunos 29 e 34	53
Figura 12 – Mapa conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelos alunos 30 e 18	54
Figura 13 – Mapa conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelos alunos 21 e 12	55
Figura 14 – Mapa conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelo aluno 39	56
Figura 15 – Mapa conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelos alunos 31 e 13	57
Figura 16 – Mapa conceitual desenvolvido na aula integradora final pelos alunos 17 e 24	63
Figura 17 – Mapa conceitual desenvolvido na aula integradora final pelos alunos 13, 07 e 08	64
Figura 18 – Mapa conceitual desenvolvido na aula integradora final pelos alunos 29 e 30	64
Figura 19 – Mapa conceitual desenvolvido na aula integradora final pelos alunos 18 e 34	65
Figura 20 – Mapa conceitual desenvolvido na aula integradora final pelos alunos 25 e 22	65

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Análise do conteúdo da Radiação do Corpo Negro nos livros de Física do PNL D (2015) seguindo alguns critérios de avaliação utilizados pelo MEC7

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PNLD – Programa Nacional do Livro Didático

FMC – Física Moderna e Contemporânea

EM – Ensino Médio

SD – Sequência Didática

UEPS – Unidade de Ensino Potencialmente Significativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativas para o ensino de Física Moderna e Contemporânea	2
1.2 Trabalhos relacionados ao ensino da Radiação do Corpo Negro no Ensino Médio4	
1.3 Análise do conteúdo da Radiação do Corpo Negro nos livros de Física do PNL D (2015)	5
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 Aprendizagem Significativa	12
2.2 Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS)	13
2.3 Mapas Conceituais.....	15
3 A TEORIA DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO.....	17
3.1 Radiação Térmica	17
3.1.1 Fórmula de Larmor.....	18
3.1.2 Espectro da Radiação.....	18
3.2 Lei de Stefan-Boltzmann	24
3.3 Leis Clássicas	25
3.3.1 2ª Lei de Wien	25
3.3.2 Explicação da 2ª lei de Wien	27
3.3.3 Teoria de Rayleigh-Jeans.....	28
3.4 Teoria de Planck	31
3.4.1 Explicação termodinâmica	31
3.4.2 Explicação estatística.....	33
3.5 Consolidação dos quantum de energia	35
4 METODOLOGIA.....	42
4.1 Tipo de pesquisa	42
4.2 Sujeitos e local da pesquisa	42
4.3 Sequência Didática proposta	42
4.4 Relato da aplicação da Sequência Didática	44
4.4.1 Situação inicial (2 aulas).....	44
4.4.2 Situação problema inicial (3 aulas)	45
4.4.3 Aprofundando conhecimento (2 aulas)	47
4.4.4 Situação problema de aprofundamento (2 aulas)	47
4.4.5 Aula integradora final (2 aulas)	49
4.4.6 Avaliação Individual (1 aula)	50
5 RESULTADOS	51
5.1 Atividade desenvolvida na (Situação inicial)	51
5.2 Atividade desenvolvida na (Situação problema inicial).....	52
5.3 Atividade desenvolvida na (Situação problema de aprofundamento).....	58
5.4 Atividade desenvolvida na (Aula integradora final).....	63
5.5 Atividade desenvolvida na (Avaliação individual)	66
5.6 Avaliação da aprendizagem.....	69
5.7 Avaliação da UEPS	69
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
REFERÊNCIAS	71

APÊNDICE A	73
ANEXO A	78
ANEXO B	79

1 INTRODUÇÃO

O motivo da escolha do tema ocorreu durante as aulas do mestrado na disciplina de Processos e Sequências de Ensino e Aprendizagem em Física em uma das atividades desenvolvidas em sala de aula. O professor da disciplina pediu à turma para que cada aluno escolhesse um conteúdo e que fosse feito uma análise desse conteúdo nos livros didáticos adotados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) 2015. Depois de escolhido o conteúdo Radiação do Corpo Negro, foi feita a análise nos quatorze livros adotados pelo PNLD 2015, em especial, os livros do 3º ano do Ensino Médio (EM) onde abordam a parte de Física Moderna e Contemporânea (FMC). Observou-se que alguns livros não trazem o conteúdo, outros de maneira incompletos e apenas dois conseguindo destaques, isso despertou a produzir um material que possa auxiliar o professor em sala de aula. Vale ressaltar, também, que durante o desenvolvimento desta dissertação realizou-se uma pesquisa relacionada aos trabalhos que apresentam o ensino da Radiação do Corpo Negro e percebe-se o pouco material publicado.

Segundo Domingui (2012), nos últimos anos, vem crescendo o debate sobre a inserção da Física Moderna no Ensino Médio e também aponta vários estudos que foram produzidos com o intuito de aproximar esse tema dos alunos da educação básica. Porém, ainda se percebe que a física lecionada não passa do século XIX.

A chamada Física Clássica ainda domina os conteúdos escolares que inclui a mecânica, termodinâmica e eletromagnetismo, como afirma Rodrigues, Bezerra e Souza (2018, p. 153):

O ensino de Física no EM, tem-se prendido apenas a conceitos clássicos, e a falta de conceitos relativos à Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio (EM) é uma das falhas graves, já que na sociedade atual, é imprescindível que o aluno tenha este conhecimento para envolver-se com o desenvolvimento tecnológico.

De fato, não é que a Física Clássica esteja ultrapassada e não possa ser abordada nas escolas, mas a introdução da FMC na educação básica é fator indispensável para que a sociedade acompanhe as grandes transformações do avanço tecnológico. Veja o que Maximiano, Cardoso e Domingui (2013, p. 98) cita:

Compreender o atual avanço tecnológico e os caminhos pelo qual a ciência moderna trilha requer, entre outros fatores, a apropriação dos conceitos da Física Moderna. Inserir tal conteúdo no Ensino Médio é fundamental para que o aluno obtenha respostas a todas as perguntas relacionadas às tecnologias que o cerca.

O que os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) orientam? que “o aprendizado de Física deve estimular os jovens a acompanhar as notícias científicas, orientando-os para a identificação sobre o assunto que está sendo tratado e promovendo meios para a interpretação de seus significados” (BRASIL, 2000, p. 27).

Dessa forma, este trabalho intitulado “INSERÇÃO DOS CONCEITOS DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO NO ENSINO MÉDIO ATRAVÉS DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA BASEADA EM UMA UEPS” tenta contribuir para que possa ser utilizado por outros professores para levar o ensino de FMC para a sala de aula e de modo que os alunos possam aprender de maneira significativa esse conteúdo.

Para que ocorra uma aprendizagem significativa é necessário que o professor propicie o entendimento dos conceitos físicos por meio da interação cognitiva entre conhecimentos novos e prévios. Para isso foi pensado na Sequência Didática (SD) fundamentada em uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) na qual culminou no Produto Educacional que é um dos objetivos deste trabalho.

O objetivo geral deste trabalho é construir uma Sequência Didática que visa a aprendizagem significativa, por meio de uma UEPS, através do estudo dos conceitos da Radiação do Corpo Negro. E especificamente:

- Inserir a Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio;
- Produzir um material potencialmente significativo;
- Aplicar a Sequência Didática com os alunos do Ensino Médio;
- Avaliar o material produzido;
- Produzir o Produto Educacional como material didático que possa ser utilizado por outros professores de Física.

1.1 Justificativas para o ensino de Física Moderna e Contemporânea

Segundo Osterman e Moreira (2000, p. 391, apud OLIVEIRA, VIANNA, GERBASSI, 2007, p. 448) destacam algumas razões para o ensino de FMC:

Despertar a curiosidade dos alunos e ajudá-los a reconhecer a física como um empreendimento humano;

Os estudantes ouvem falar em temas como buracos negros e big bang na televisão ou em filmes de ficção científica, mas nunca nas aulas de física;

O ensino de temas atuais da física pode contribuir para transmitir aos alunos uma visão mais correta dessa ciência e da natureza do trabalho científico, superando a visão linear do desenvolvimento científico, hoje presente nos livros didáticos e nas aulas de física.

A Física é, sem dúvida, um exemplo bem-sucedido de construção do conhecimento humano e contribui de maneira significativa para um contínuo avanço tecnológico bem como para a formação científica e cultural do homem moderno, logo a sua compreensão é extremamente importante para o desenvolvimento da sociedade moderna (RODRIGUES, BEZERRA, SOUZA, p. 153).

O PCN+ diz que “alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria de forma que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos[...]” (BRASIL, 2002, p 70).

Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM): “uma proposta curricular que se pretenda **contemporânea** deverá incorporar como um dos seus eixos as tendências apontadas para o século XXI mesmo considerando os obstáculos a superar” (BRASIL, 2000, p. 12 grifo do autor).

Pinto e Zanetic (2009, p. 7) comenta no seu artigo que:

É preciso transformar o ensino de Física tradicionalmente oferecido por nossas escolas em um ensino que contemple o desenvolvimento da Física Moderna, não como uma mera curiosidade, mas como uma Física que surge para explicar fenômenos que a Física Clássica não explica, constituindo uma nova visão de mundo. Uma Física que hoje é responsável pelo atendimento de novas necessidades que surgem a cada dia, tornando-se cada vez mais básicas para o homem contemporâneo[...].

Segundo Terrazan (1992, p. 210): “a influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mesmo mundo, define, por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos na escola de 2º grau”.

Portanto, não há dúvidas de que é preciso inserir a FMC no EM, visto que é indispensável para que nossos alunos e a sociedade em geral tenham entendimento do mundo moderno e que é a base do grande avanço tecnológico. Além disso, percebe-se que os alunos têm demonstrado interesses em discutir temas voltados nessa área, sendo assim, os professores podem estimular e despertar nos alunos o gosto pela Física.

1.2 Trabalhos relacionados ao ensino da Radiação do Corpo Negro no Ensino Médio

Meggiolaro e Betz (2012) apresentam uma proposta para ensinar Radiação do Corpo Negro em sala de aula. Foi desenvolvida com alunos do 3º ano noturno de uma Escola Estadual do município de Ijuí/RS, uma atividade voltada ao uso de uma planilha eletrônica referente aos conceitos da Radiação do Corpo Negro, com texto de apoio e guia de atividades do aluno. Os resultados finais dessa aplicação mostraram que os alunos tiveram algumas dificuldades e para uma perfeita aplicação deste trabalho foi preciso alguns requisitos anteriores: noção de como utilizar a calculadora científica, noção sobre o uso do computador, voltado a planilhas eletrônicas, e revisão dos conceitos de temperatura e calor.

Morais e colaboradores (2016) apresentam a proposta da construção de um experimento de baixo custo para explorar o conteúdo da Radiação do Corpo Negro no Ensino Médio, no qual é possível trabalhar tal conteúdo de forma direta, objetiva e acessível ao aluno. O experimento consiste em analisar qual corpo esquenta e esfria mais rápido se é o preto ou o branco, bem como fazer um choque de teorias, onde o conteúdo de Física Moderna aparecerá como alternativa para explicar os resultados experimentais e a Física Clássica não possui respostas.

Musiau (2015) propõe em sua dissertação três tópicos relacionados à FMC com aplicação no Ensino Médio: Radiação do Corpo Negro, Efeito Fotoelétrico e Espectroscopia. A pesquisa de estudo foi realizada na EEEFM Júlio Guerra em Ji-Paraná com alunos do 3º A do Ensino Médio e para isso usou-se uma Sequência Didática constituída de questionários, palavra cruzada, caça palavras, simulados, vídeos, texto, roteiro de atividades para orientar no manuseio da simulação computacional, experimentos de baixo custo, vídeos dos experimentos propostos, teatro abordando a bibliografia de Hertz, Planck e Einstein. Os resultados mostram favoráveis à facilitação do ensino-aprendizagem dos conceitos físicos propostos e tornam a aula mais atraente e objetiva. Além disso, a Sequência Didática resultou num Produto Educacional disponibilizado aos professores interessados, com a finalidade de auxiliá-los na sua prática pedagógica, o qual está incluído em um DVD.

Machado (2016) desenvolveu recentemente em sua dissertação uma unidade didática para o ensino dos conceitos de Transmissão de Calor e da Radiação do Corpo Negro. A pesquisa foi aplicada com os alunos do 2º ano do Ensino Médio de uma escola

particular na cidade de Formigas – MG e para isso utilizou e discutiu várias metodologias de ensino, tais como, experimentos, textos de divulgação científica, trabalhos em grupos, vídeos e simuladores. A parte que contempla o ensino da Radiação do Corpo Negro foi desenvolvido em três aulas e utilizou-se texto de divulgação científica, simulador e questionários. Mudança de postura, interesse na realização das atividades, socialização e receptividade na metodologia de ensino foram alguns dos resultados que os alunos tiveram com a aplicação da pesquisa.

Silva (2015) desenvolveu em sua dissertação três Unidades Didáticas para inserção de Astronomia e Física Moderna no EM utilizando como ponto de partida o estudo do Sol. A intervenção educacional foi aplicada na Escola Estadual Amaro Cavalcante em São Tomé – RN com alunos do 3º ano do Ensino Médio em 2014. Durante a intervenção foram aplicados questionários para levantamento dos conhecimentos prévios dos alunos e durante a execução da proposta utilizou-se uma diversidade de recursos educativos alternativos ao livro didático, tais como, reportagens, demonstração experimental, textos de livros paradidáticos, vídeos, entre outros. A Unidade Didática que contemplou o ensino da Radiação do Corpo Negro foi desenvolvida em 4 aulas de 45 minutos, onde utilizou-se questionário, demonstração experimental, aula expositiva e leitura de texto. Além da proposta resultar em um Produto Educacional, os alunos ficaram motivados e interessados pelo tema estudado e obtiveram uma aprendizagem satisfatória com a aplicação da pesquisa.

Nesta pesquisa, foram encontrados cinco trabalhos voltados para o ensino da Radiação do Corpo Negro no EM e nenhuma proposta baseada em uma UEPS. Logo percebe-se o pouco material produzido e sendo assim é nesse sentido que reforço a importância de inserção desse conteúdo e na produção de material que auxilie o professor em sala de aula.

1.3 Análise do conteúdo da Radiação do Corpo Negro nos livros de Física do PNL D (2015)

O Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) destaca-se como o programa mais antigo do Ministério da Educação no que diz respeito à política de distribuição de livros didáticos aos estudantes de escolas públicas.

O PNLD (2015) para o Ensino de Física traz uma coleção de quatorze livros que servem de referência para que os professores possam utilizá-los com seus alunos em sala de aula. Tendo em vista a importância política do PNLD para a educação pública brasileira, foi feita uma análise do conteúdo da Radiação do Corpo Negro nesses livros, em especial os livros de Física 3 onde abordam a parte de Física Moderna. A análise baseou-se em alguns critérios de avaliação utilizados pelo MEC e para tal, construímos uma tabela onde na vertical consta os critérios utilizados na avaliação e na horizontal os diversos livros didáticos.

De acordo com os critérios seguidos, apenas três livros não abordam o conteúdo da Radiação do Corpo Negro. Tratam-se dos livros: **Física Interação e Tecnologia**, de Aurélio G. Filho e Carlos Toscano, **Quanta Física** de Carlos Aparecido Kantor, Lilio Alonso Paoliello Júnior, Luís Carlos de Menezes, Marcelo de C. Boniatti, Osvaldo Canato Júnior e Viviane Moraes Alves e **Conexões com a Física** de Gloria Martini, Walter Spinelli, Hugo Carneiro Reis, Blaidi Sant'Anna.

Outros três livros apresentam uma boa contextualização, expressões matemáticas, ilustrações gráficas, exercícios, mas não abordam arranjos experimentais que possam ser praticados em ambiente escolar. Porém, cabe destacar a sua contextualização e precedentes históricos das leis que a física clássica não explicava sobre determinado comportamento gráfico da Radiação do Corpo Negro, por exemplo, a lei de Wien e Rayleigh-jeans que os livros abordam. Tratam-se dos livros: **Física3** de José Roberto Piqueira, Wilson Carron, Osvaldo Guimarães, **Física3** Bonjorno, Clinton, Eduardo, Pradro e **Física3** de Gualter, Newton, Helou.

Apenas dois livros apresentaram arranjos experimentais ou experimentos didáticos realizáveis em ambientes escolares típicos. Tratam-se dos livros **Compreendendo a Física** de Alberto Gaspar e **Física em Contextos** de Mauricio Pietrocola, Alexander Pogibin, Renata de Andrade, Talita Raquel Romero. Veja a seguir o quadro onde identificamos em cada um dos livros analisados se atendem esses critérios:

QUADRO 1 – Análise do conteúdo da Radiação do Corpo Negro nos livros de Física do PNLD (2015) seguindo alguns critérios de avaliação utilizados pelo MEC.

<p style="text-align: center;">Livros</p> <p style="text-align: center;">Critérios de avaliação utilizados pelo MEC</p>	<p style="text-align: center;">Compreendendo a Física Alberto Gaspar</p>	<p style="text-align: center;">Física Alysson R. Artuso Marlon Wrublewski</p>	<p style="text-align: center;">Física - Conceitos e Contextos: Pessoal, Social, Histórico Maurício Pietrocola Alexandre Pogibin Renata de Andrade Talita R. Romero</p>	<p style="text-align: center;">Física José R. C. Piqueira Wilson Carron José O. de S. Guimarães</p>
<p>Utiliza o vocabulário científico como um recurso que auxilia a aprendizagem das teorias e explicações físicas, sem privilegiar a memorização de termos técnicos e definições, não se pautando, portanto, somente por questões de cópia mecânica ou memorização;</p>	ok	ok	ok	ok
<p>Apresenta exercícios e problemas, de modo claro, de acordo com a função de cada tipo de questão/atividade. Os problemas devem ser apresentados mediante enunciados acompanhados da contextualização da situação-problema específica e devem ser abertos o suficiente para estimular/permitir estimativas e considerações por parte do professor e do aluno;</p>	ok	ok	ok	ok
<p>Apresenta arranjos experimentais ou experimentos didáticos realizáveis em ambientes escolares típicos, previamente testados e com periculosidade controlada, ressaltando a necessidade de alerta acerca dos cuidados específicos para cada procedimento;</p>	ok	Não apresenta	ok	Não apresenta
<p>Utiliza ilustrações de forma adequada, tendo em vista sua real necessidade e sua referência explícita e complementar ao texto verbal;</p>	ok	ok	ok	ok
<p>Apresenta expressões matemáticas de leis, sempre acompanhadas de seus enunciados próprios e em forma adequada, bem como da especificação de suas condições de produção ou criação;</p>	ok	Não apresenta	ok	ok
<p>Apresenta os conteúdos conceituais da Física sempre acompanhados, ou partindo de sua necessária contextualização, seja em relação aos seus contextos sócio-cultural-histórico-econômicos de produção, seja em relação a contextos cotidianos em que suas utilizações se façam pertinentes, evitando a utilização de contextualizações artificiais para esses conteúdos.</p>	ok	ok	ok	ok

<p style="text-align: center;">Livros</p> <p>Critérios de avaliação utilizados pelo MEC</p>	<p>Física Aula por Aula Claudio Xavier Benigno Barreto</p>	<p>Física Contexto e Aplicações Antônio Máximo Beatriz Alvarenga</p>	<p>Física Bonjorno Clinton Eduardo Prado</p>	<p>Física Interação e Tecnologia Aurélio G. Filho Carlos Toscano</p>
<p>Utiliza o vocabulário científico como um recurso que auxilia a aprendizagem das teorias e explicações físicas, sem privilegiar a memorização de termos técnicos e definições, não se pautando, portanto, somente por questões de cópia mecânica ou memorização;</p>	ok	ok	ok	Não apresenta
<p>Apresenta exercícios e problemas, de modo claro, de acordo com a função de cada tipo de questão/atividade. Os problemas devem ser apresentados mediante enunciados acompanhados da contextualização da situação-problema específica e devem ser abertos o suficiente para estimular/permitir estimativas e considerações por parte do professor e do aluno;</p>	ok	Não apresenta	ok	Não apresenta
<p>Apresenta arranjos experimentais ou experimentos didáticos realizáveis em ambientes escolares típicos, previamente testados e com periculosidade controlada, ressaltando a necessidade de alerta acerca dos cuidados específicos para cada procedimento;</p>	Não apresenta	Não apresenta	Não apresenta	Não apresenta
<p>Utiliza ilustrações de forma adequada, tendo em vista sua real necessidade e sua referência explícita e complementar ao texto verbal;</p>	ok	ok	ok	Não apresenta
<p>Apresenta expressões matemáticas de leis, sempre acompanhadas de seus enunciados próprios e em forma adequada, bem como da especificação de suas condições de produção ou criação;</p>	Não apresenta	Não apresenta	ok	Não apresenta
<p>Apresenta os conteúdos conceituais da Física sempre acompanhados, ou partindo de sua necessária contextualização, seja em relação aos seus contextos sócio-cultural-histórico-econômicos de produção, seja em relação a contextos cotidianos em que suas utilizações se façam pertinentes, evitando a utilização de contextualizações artificiais para esses conteúdos.</p>	Não apresenta	ok	ok	Não apresenta

<p style="text-align: center;">Livros</p> <p>Critérios de avaliação utilizados pelo MEC</p>	<p>Física para o Ensino Médio</p> <p>Luiz F. Fuke Kazuhito Yamamoto</p>	<p>Física</p> <p>Ricardo H. Doca Newton V. Bôas Gualter J. Biscuola</p>	<p>Quanta Física</p> <p>Carlos A. Kantor Lilio A. Paoliello Jr. Luís C. de Menezes Marcelo de C. Boniatti</p>	<p>Ser Protagonista Física</p> <p>Angelo Stefanovists</p>
<p>Utiliza o vocabulário científico como um recurso que auxilia a aprendizagem das teorias e explicações físicas, sem privilegiar a memorização de termos técnicos e definições, não se pautando, portanto, somente por questões de cópia mecânica ou memorização;</p>	ok	ok	Não apresenta	ok
<p>Apresenta exercícios e problemas, de modo claro, de acordo com a função de cada tipo de questão/atividade. Os problemas devem ser apresentados mediante enunciados acompanhados da contextualização da situação-problema específica e devem ser abertos o suficiente para estimular/permitir estimativas e considerações por parte do professor e do aluno;</p>	Não apresenta	ok	Não apresenta	ok
<p>Apresenta arranjos experimentais ou experimentos didáticos realizáveis em ambientes escolares típicos, previamente testados e com periculosidade controlada, ressaltando a necessidade de alerta acerca dos cuidados específicos para cada procedimento;</p>	Não apresenta	Não apresenta	Não apresenta	Não apresenta
<p>Utiliza ilustrações de forma adequada, tendo em vista sua real necessidade e sua referência explícita e complementar ao texto verbal;</p>	ok	ok	Não apresenta	ok
<p>Apresenta expressões matemáticas de leis, sempre acompanhadas de seus enunciados próprios e em forma adequada, bem como da especificação de suas condições de produção ou criação;</p>	ok	ok	Não apresenta	Não apresenta
<p>Apresenta os conteúdos conceituais da Física sempre acompanhados, ou partindo de sua necessária contextualização, seja em relação aos seus contextos sócio-cultural-histórico-econômicos de produção, seja em relação a contextos cotidianos em que suas utilizações se façam pertinentes, evitando a utilização de contextualizações artificiais para esses conteúdos.</p>	ok	ok	Não apresenta	ok

<p style="text-align: center;">Livros</p> <p>Critérios de avaliação utilizados pelo MEC</p>	<p>Conexões com a Física</p> <p>Gloria Martini Walter Spinelli Hugo C. Reis Blaidi Sant'Anna</p>	<p>Física Ciência e Tecnologia</p> <p>Carlos M. A. Torres Nicolau G. Ferraro Paulo A. de T. do S. Paulo C. M. Penteado</p>		
<p>Utiliza o vocabulário científico como um recurso que auxilia a aprendizagem das teorias e explicações físicas, sem privilegiar a memorização de termos técnicos e definições, não se pautando, portanto, somente por questões de cópia mecânica ou memorização;</p>	<p>Não apresenta</p>	<p>ok</p>		
<p>Apresenta exercícios e problemas, de modo claro, de acordo com a função de cada tipo de questão/atividade. Os problemas devem ser apresentados mediante enunciados acompanhados da contextualização da situação-problema específica e devem ser abertos o suficiente para estimular/permitir estimativas e considerações por parte do professor e do aluno;</p>	<p>Não apresenta</p>	<p>ok</p>		
<p>Apresenta arranjos experimentais ou experimentos didáticos realizáveis em ambientes escolares típicos, previamente testados e com periculosidade controlada, ressaltando a necessidade de alerta acerca dos cuidados específicos para cada procedimento;</p>	<p>Não apresenta</p>	<p>Não apresenta</p>		
<p>Utiliza ilustrações de forma adequada, tendo em vista sua real necessidade e sua referência explícita e complementar ao texto verbal;</p>	<p>Não apresenta</p>	<p>ok</p>		
<p>Apresenta expressões matemáticas de leis, sempre acompanhadas de seus enunciados próprios e em forma adequada, bem como da especificação de suas condições de produção ou criação;</p>	<p>Não apresenta</p>	<p>Não apresenta</p>		
<p>Apresenta os conteúdos conceituais da Física sempre acompanhados, ou partindo de sua necessária contextualização, seja em relação aos seus contextos sócio-cultural-histórico-econômicos de produção, seja em relação a contextos cotidianos em que suas utilizações se façam pertinentes, evitando a utilização de contextualizações artificiais para esses conteúdos.</p>	<p>Não apresenta</p>	<p>ok</p>		

Apesar do livro **Física em Contextos** de Mauricio Pietrocola, Alexander Pogibin, Renata de Andrade, Talita Raquel Romero apresentar todos os critérios da avaliação, o destaque em especial fica com o livro **Compreendendo a Física** de Alberto Gaspar, onde ele aborda com um nível melhor de contextualização, informações gráficas, analogia que o livro faz entre as ondas estacionárias numa corda geradas por osciladores nas extremidades e osciladores eletromagnéticos dentro da cavidade do Corpo Negro, exercícios e informações complementares sobre o conteúdo da Radiação do Corpo Negro.

Visto que a maioria dos livros didáticos não trazem uma estruturação adequada e se mostram por incompletos de acordo com os critérios analisados, cabe destacar que para nós professores podemos fazer uma análise do que é melhor em cada livro extraindo um pouco de cada quesito analisado sobre o conteúdo da Radiação do Corpo Negro. Isso mostra que o professor não deve se prender somente aos livros textos, mas de saber utilizar técnicas diferentes de ensino. No caso, é o que se utiliza neste trabalho.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 1, apresentamos os objetivos deste trabalho, uma análise da FMC no Ensino Médio, alguns trabalhos relacionados ao conteúdo da Radiação do Corpo Negro, uma análise do conteúdo da Radiação do Corpo Negro feita nos livros do PNLD 2015 e a organização metodológica usada para o desenvolvimento do Produto Educacional. No capítulo 2, os fundamentos da Aprendizagem Significativa, da UEPS e dos Mapas Conceituais. No capítulo 3, a teoria da Radiação do Corpo Negro. No capítulo 4, o desenvolvimento da SD e o relato da aplicação. No capítulo 5, os resultados das atividades desenvolvidas durante a aplicação e finalmente, no capítulo 6, apresentamos as conclusões e considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aprendizagem Significativa

David Ausubel é um representante do cognitivismo e propôs a teoria da Aprendizagem Significativa a qual objetiva facilitar a aprendizagem do aluno. Para Ausubel, segundo Moreira (2008), aprendizagem significa organização e integração do novo material na estrutura cognitiva. A Aprendizagem Significativa é definida da seguinte forma:

Aprendizagem significativa é aquela em que ideias expressas simbolicamente interagem de maneira substantiva e não-arbitrária com aquilo que o aprendiz já sabe. Substantiva quer dizer não-literal, não ao pé-da-letra, e não-arbitrária significa que a interação não é com qualquer idéia prévia, mas sim com algum conhecimento especificamente relevante já existente na estrutura cognitiva do sujeito que aprende (MOREIRA, 2010, p. 2).

De acordo com a definição, o conhecimento relevante já existente na estrutura cognitiva do sujeito é o que Ausubel chama de subsunçor. De maneira simples, subsunçor é o nome que se dá a um conhecimento especificamente relevante, que já faz parte da estrutura cognitiva do sujeito que aprende, que permite atribuir significado a um novo conhecimento que lhe é mostrado ou por ele descoberto. Sendo assim, para que esse novo conhecimento receba algum significado, depende da existência de conhecimentos prévios (MOREIRA, 2010). Moreira (2010) afirma que:

O conhecimento prévio é, na visão de Ausubel, a variável isolada mais importante para a aprendizagem significativa de novos conhecimentos. Isto é, se fosse possível isolar uma única variável como sendo a que mais influencia novas aprendizagens, esta variável seria o conhecimento prévio, os subsunçores já existentes na estrutura cognitiva do sujeito que aprende (MOREIRA, 2010, p. 7).

A aprendizagem significativa ocorre quando há a interação do novo conhecimento com o subsunçor (conhecimento prévio) já existente na estrutura cognitiva do indivíduo que aprende e além disso, à medida que o subsunçor serve de base para a atribuição de significados ao novo conhecimento, ele também se modifica e nessa interação vai adquirindo novos significados e se tornando mais diferenciado e estável (MOREIRA, 2012).

Chama-se de diferenciação progressiva o processo que ocorre quando os subsunçores vão adquirindo novos significados e se tornando cada vez mais elaborados, mais diferenciados, mais capazes de servirem de âncora para a atribuição de significados

a novos conhecimentos. Ao passo que a reconciliação integrativa é a reorganização dos subsunçores que foram relacionados e modificados significativamente, é também uma forma de diferenciação progressiva da estrutura cognitiva (MOREIRA, 2012).

No caso de não existir o subsunçor adequado para dar significado ao novo conhecimento, ou seja, o conhecimento prévio na estrutura cognitiva do aprendiz, é sugerido os organizadores prévios. O “Organizador prévio é um recurso instrucional apresentado em um nível mais alto de abstração, generalidade e inclusividade em relação ao material de aprendizagem” (MOREIRA, 2010, p. 11).

Existem duas condições para a ocorrência da aprendizagem significativa. A primeira é que o material deve ser potencialmente significativo, ou seja, o material tem que ser relacionável com a estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não-arbitrária e não-literal. Dentro dessa estrutura cognitiva do aprendiz devem estar os conceitos subsunçores, com os quais o material é relacionável. A segunda é que o aprendiz apresente predisposição para aprender, ou seja, disposição para relacionar o novo material, potencialmente significativo, à sua estrutura cognitiva (MOREIRA, 2009a).

A proposta de trabalho foi fundamentada nessa teoria de ensino buscando desenvolver um material potencialmente significativo e que fosse relacionável com os conhecimentos prévios dos alunos para evidenciar a aprendizagem significativa do tema proposto.

2.2 Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS)

As Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) proposta por Moreira (2011, p 2) "São sequências de ensino fundamentadas teoricamente, voltadas para a aprendizagem significativa, não mecânica, que podem estimular a pesquisa aplicada em ensino, aquela voltada diretamente à sala de aula". É válido lembrar que alguns princípios devem ser seguidos na construção de uma UEPS:

- o conhecimento prévio é a variável que mais influencia a aprendizagem;
- a aprendizagem significativa depende da intencionalidade do aprendiz;
- os materiais e as estratégias de ensino devem ser potencialmente significativos;
- são as situações que dão sentido aos conceitos;
- a primeira ação cognitiva para resolver uma situação-problema é a construção de um modelo mental na memória de trabalho;
- o professor é o organizador do ensino;

- a avaliação deve buscar evidências de aprendizagem significativa; esta é progressiva;
- um episódio educativo envolve uma relação triádica entre aluno, docente e materiais educativos dentro de um contexto;
- a aprendizagem deve ser significativa e crítica (MOREIRA, 2011, p. 6).

Nesta proposta de trabalho, foi construída uma UEPS e aplicada como metodologia de ensino. Moreira (2011) propõe os seguintes passos para a construção de uma UEPS:

1. definir o tópico específico a ser abordado, identificando seus aspectos declarativos e procedimentais tais como aceitos no contexto da matéria de ensino na qual se insere esse tópico;
2. criar/propor situação(ões) – discussão, questionário, mapa conceitual, mapa mental, situação-problema, etc. – que leve(m) o aluno a externalizar seu conhecimento prévio, aceito ou não-aceito no contexto da matéria de ensino, supostamente relevante para a aprendizagem significativa do tópico (objetivo) em pauta;
3. propor situações-problema, em nível bem introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno, que preparem o terreno para a introdução do conhecimento (declarativo ou procedimental) que se pretende ensinar; estas situações problema podem envolver, desde já, o tópico em pauta, mas não para começar a ensiná-lo; tais situações-problema podem funcionar como organizador prévio; são as situações que dão sentido aos novos conhecimentos, mas, para isso, o aluno deve percebê-las como problemas e deve ser capaz de modelá-las mentalmente; modelos mentais são funcionais para o aprendiz e resultam da percepção e de conhecimentos prévios (invariantes operatórios); estas situações-problema iniciais podem ser propostas através de simulações computacionais, demonstrações, vídeos, problemas do cotidiano, representações veiculadas pela mídia, problemas clássicos da matéria de ensino, etc., mas sempre de modo acessível e problemático, i.e., não como exercício de aplicação rotineira de algum algoritmo;
4. uma vez trabalhadas as situações iniciais, apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva, i.e., começando com aspectos mais gerais, inclusivos, dando uma visão inicial do todo, do que é mais importante na unidade de ensino, mas logo exemplificando, abordando aspectos específicos; a estratégia de ensino pode ser, por exemplo, uma breve exposição oral seguida de atividade colaborativa em pequenos grupos que, por sua vez, deve ser seguida de atividade de apresentação ou discussão em grande grupo;
5. em continuidade, retomar os aspectos mais gerais, estruturantes (i.e., aquilo que efetivamente se pretende ensinar), do conteúdo da unidade de ensino, em nova apresentação (que pode ser através de outra breve exposição oral, de um recurso computacional, de um texto, etc.), porém em nível mais alto de complexidade em relação à primeira apresentação; as situações-problema devem ser propostas em níveis crescentes de complexidade; dar novos exemplos, destacar semelhanças e diferenças relativamente às situações e exemplos já trabalhados, ou seja, promover a reconciliação integradora; após esta segunda apresentação, propor alguma outra atividade colaborativa que leve os alunos a interagir socialmente, negociando significados, tendo o professor como mediador; esta atividade pode ser a resolução de problemas, a construção de uma mapa conceitual ou um diagrama V, um experimento de laboratório, um pequeno projeto, etc., mas deve, necessariamente, envolver negociação de significados e mediação docente;

6. concluindo a unidade, dar seguimento ao processo de diferenciação progressiva retomando as características mais relevantes do conteúdo em questão, porém de uma perspectiva integradora, ou seja, buscando a reconciliação integrativa; isso deve ser feito através de nova apresentação dos significados que pode ser, outra vez, uma breve exposição oral, a leitura de um texto, o uso de um recurso computacional, um audiovisual, etc.; o importante não é a estratégia, em si, mas o modo de trabalhar o conteúdo da unidade; após esta terceira apresentação, novas situações-problema devem ser propostas e trabalhadas em níveis mais altos de complexidade em relação às situações anteriores; essas situações devem ser resolvidas em atividades colaborativas e depois apresentadas e/ou discutidas em grande grupo, sempre com a mediação do docente;

7. a avaliação da aprendizagem através da UEPS deve ser feita ao longo de sua implementação, registrando tudo que possa ser considerado evidência de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado; além disso, deve haver uma avaliação somativa individual após o sexto passo, na qual deverão ser propostas questões/situações que impliquem compreensão, que evidenciem captação de significados e, idealmente, alguma capacidade de transferência; tais questões/situações deverão ser previamente validadas por professores experientes na matéria de ensino; a avaliação do desempenho do aluno na UEPS deverá estar baseada, em pé de igualdade, tanto na avaliação formativa (situações, tarefas resolvidas colaborativamente, registros do professor) como na avaliação somativa;

8. a UEPS somente será considerada exitosa se a avaliação do desempenho dos alunos fornecer evidências de aprendizagem significativa (captação de significados, compreensão, capacidade de explicar, de aplicar o conhecimento para resolver situações-problema). A aprendizagem significativa é progressiva, o domínio de um campo conceitual é progressivo; por isso, a ênfase em evidências, não em comportamentos finais (MOREIRA, 2011, p. 3-5).

2.3 Mapas Conceituais

Os Mapas Conceituais são ferramentas gráficas que indicam relações entre conceitos para organização e representação do conhecimento. Geralmente os conceitos vêm dentro de círculos ou quadros de alguma espécie, são interligados por linhas e frases de ligação sobre as linhas (NOVAK e CAÑAS, 2010). O Mapa Conceitual reflete a organização mental de determinado assunto do sujeito que elaborou o mapa. Portanto não existe Mapa Conceitual correto. Moreira (2012) cita que:

Mapas conceituais podem seguir um modelo hierárquico no qual conceitos mais inclusivos estão no topo da hierarquia (parte superior do mapa) e conceitos específicos, pouco abrangentes, estão na base (parte inferior). Mas este é apenas um modelo, mapas conceituais não precisam necessariamente ter este tipo de hierarquia. [...]Setas podem ser utilizadas para dar um sentido de direção a determinadas relações conceituais, mas não obrigatoriamente (MOREIRA, 2012, p. 2).

Os mapas conceituais podem ser usados em diversas situações e citamos duas: instrumento de ensino e de avaliação de aprendizagem. Segundo Moreira (2012, p. 3),

como instrumento de ensino “é possível traçar-se um Mapa Conceitual para uma única aula, para uma unidade de estudo, para um curso ou, até mesmo, para um programa educacional completo” e como instrumento de avaliação da aprendizagem “Os mapas conceituais são um bom recurso para uma avaliação qualitativa, subjetiva, que busque evidências de aprendizagem significativa” (MOREIRA, 2013, p. 35).

Veja na figura 1 o exemplo de um Mapa Conceitual construído pelo professor pesquisador com o uso do software IHMC CmapTools¹. O software pode ser baixado gratuitamente através do endereço: <https://cmap.ihmc.us/>.

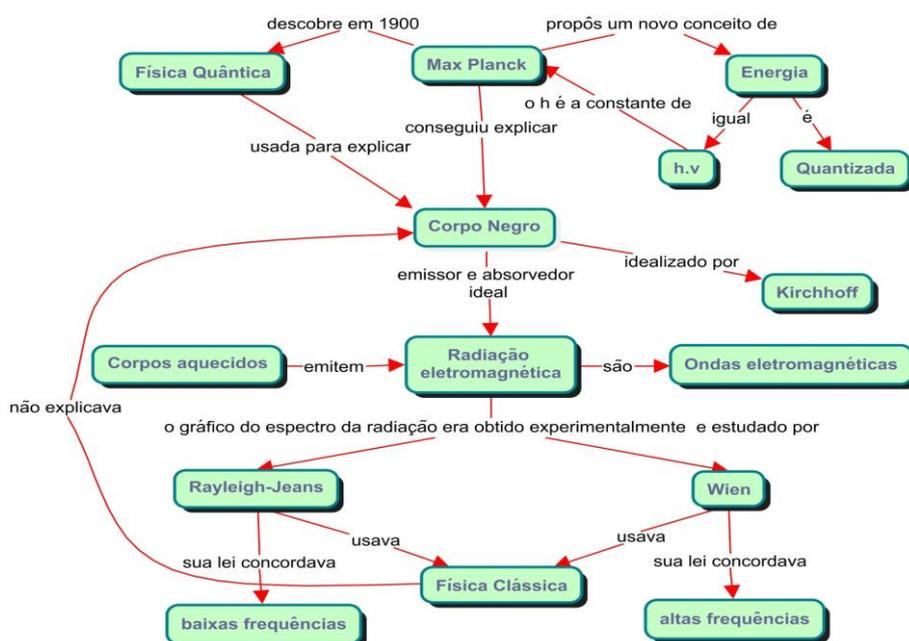


Figura 1 – Mapa Conceitual do conteúdo da Radiação do Corpo Negro construído com o software Cmap Tools.

Neste trabalho de pesquisa, utilizamos os Mapas Conceituais como instrumento de atividade para verificação de evidência de aprendizagem significativa, pois se mostram bastante favoráveis devido a ampla gama de informações e o domínio dos conceitos apresentados por quem elabora.

¹ O software Cmap é resultado de uma pesquisa realizada no Instituto de Cognição Humana e de Máquinas (IHMC) da Flórida. Ele permite que os usuários construam, naveguem, compartilhem e critiquem modelos de conhecimento representados como mapas conceituais.

3 A TEORIA DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

Neste capítulo, apresentamos a contextualização da teoria quântica nos moldes como realmente foi desenvolvida diferentemente como é mostrado na maioria dos livros textos. Apesar deste trabalho ser direcionado para o EM, é essencial que o professor tenha um conhecimento mais aprofundado do que o aluno. Logo, não há como fugir dos cálculos matemáticos que esta teoria apresenta.

3.1 Radiação Térmica

O fenômeno da radiação térmica desempenhou um papel de destaque na história da física, pois foi na tentativa descrevê-lo teoricamente que Max Planck introduziu a sua famosa constante, cuja presença tornou-se o marco de uma nova física, a física quântica.

Podemos constatar a existência da radiação térmica ao aproximarmos-nos de uma brasa incandescente. Mesmo se o ar ao nosso redor estiver frio, percebemos um aquecimento da nossa pele. Nesta situação, a maior parte do calor que nos atinge não se propaga por convecção no ar, e sim na forma de radiação eletromagnética. Também percebemos esta radiação na cor avermelhada adquirida pelo carvão ao queimar. O carvão é normalmente preto, ou seja, não reflete a luz, mas ao alcançar uma temperatura suficientemente alta, passa a emitir na parte visível do espectro uma quantidade de radiação suficiente para observação. Se observarmos o aquecimento de um pedaço de ferro com uma fonte intensa de calor, por exemplo uma forja, poderemos notar, além do rápido aumento com a temperatura da quantidade de radiação emitida, uma modificação na cor do objeto: após tornar-se vermelho, o objeto passará a adquirir uma cor branca ou até azulada. Isto indica que a distribuição da radiação em comprimento de onda desloca-se com o aumento da temperatura para valores menores. Equivalentemente, a distribuição da radiação em frequência desloca-se para valores maiores.

O fato de existir uma correlação entre temperatura e emissão de radiação não é em si surpreendente. Afinal, de acordo com a visão corpuscular da matéria, temperatura é uma medida da agitação randômica das partículas. Como as partículas que constituem a matéria possuem cargas e cargas em movimento acelerado emitem radiação, o fenômeno de radiação térmica é qualitativamente entendível na luz da teoria clássica. Porém, como veremos, esta teoria revela-se incapaz de fornecer uma descrição quantitativa aceitável.

3.1.1 Fórmula de Larmor

Uma partícula carregada (q) e acelerada (a) no espaço, de modo que a sua velocidade $v \ll c$, emite no espaço uma radiação dada por

$$R = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} a^2, \quad (1.1)$$

onde R é a potência irradiada pela partícula no espaço.

A Eq. (1.1) foi derivada pela primeira vez por Larmor², em 1897, para uma partícula não relativística. No caso de uma partícula relativística, a potência irradiada depende do tipo de trajetória descrita pela partícula.

Assim sendo, quando um corpo é aquecido (temperatura T) as partículas constituintes aumentam gradualmente o valor do seu movimento vibratório, conseqüentemente, a sua aceleração é proporcional ao quadrado da velocidade angular de oscilação dos átomos do material (i. e., $a \sim \omega^2$), então é razoável supor que com o aumento da temperatura teremos um aumento linear desta frequência (i. e., $\omega \sim T$), logo da Eq. (1.1) teremos a seguinte relação de proporcionalidade entre a radiação e a temperatura:

$$R_T \sim \omega^4 \sim T^4. \quad (1.2)$$

A emissão da radiação de um corpo aquecido é um espectro contínuo e independe do material, depende essencialmente da temperatura conforme ilustra a expressão (1.2). A visibilidade de um corpo deve-se a luz emitida e refletida pelo mesmo, mas caso tenhamos este corpo a uma temperatura não muito alta, a luz emitida é muito menor do que a luz refletida, conseqüentemente, a sua visualidade só é possível com a presença de luz no meio para termos o processo de reflexão. No caso de um corpo numa temperatura muito alta (as estrelas por exemplo), apresenta uma luminosidade própria.

3.1.2 Espectro da Radiação

O espectro da radiação eletromagnética emitido por um corpo quente, e quantificado através da grandeza radiância (potência/área x comprimento de onda) $R(\lambda, T)$, varia continuamente com o comprimento de onda (λ), apresentando um valor máximo para um dado comprimento de onda, λ_{max} . Sabemos que um metal a 600 °C (no forno elétrico) apresenta uma fraca coloração avermelhada, enquanto que o mesmo

² Ver o trabalho original de Larmor: *On the statistical theory of radiation*, publicado em *Philosophical Magazine* **20**, 350 (1910).

material em temperaturas bem mais altas (na siderurgia) tem uma coloração azulada. O exemplo mais familiar que temos da emissão de radiação térmica é o Sol, cujo espectro abrange toda região visível incluindo comprimentos de ondas maiores (infravermelho) e menores (ultravioleta).

A radiação, quando emitida sobre um corpo, interage até que o equilíbrio térmico seja atingido. Definindo por e a potência por unidade de área da energia radiante emitida por uma fonte e por a a potência por unidade de área absorvida na superfície de um corpo, então, em 1833, Ritchie verificou o **princípio da proporcionalidade** entre a emissão e absorção total, na sua famosa experiência com dois corpos radiantes A e B, usando um termômetro diferencial, e estabeleceu a seguinte relação no equilíbrio térmico:

$$\frac{e_A}{a_A} = \frac{e_B}{a_B}. \quad (1.3)$$

Considere um **corpo negro** como sendo aquele que absorve 100% da radiação nele incidido. Vamos assumir que o corpo B seja um corpo negro ($a_B = a_N = 1$), então da relação (1.3), obtemos

$$e_N = \frac{e_A}{a_A} > e_A, \quad (1.4)$$

que demonstra que o corpo negro possui uma potência emissora maior do que a de qualquer outro corpo.

Um corpo com estas características ($a_N = 1$) é um sistema ideal, que não pode ser encontrado na prática sob condições normais. Independente da sua composição, verifica-se que todos os corpos negros à mesma temperatura T emitem radiação térmica com mesmo espectro (distribuição universal). Um bom modelo de corpo negro são as estrelas, como o Sol, no qual a radiação produzida em seu interior é expelida para o universo e conseqüentemente aquece o nosso planeta.

A primeira menção a corpos negros deve-se a Gustav Kirchhoff em 1860, em seu estudo sobre a espectrografia dos gases. Muitos estudiosos tentaram conciliar o conceito de corpo negro com a distribuição de energia prevista pela termodinâmica, mas os espectros obtidos experimentalmente, ainda que válidos para baixas frequências, mostravam-se muito discrepantes da previsão teórica. Experimentalmente, a radiação mais próxima a de um corpo negro é aquela emitida por pequenas aberturas de extensas cavidades, conforme ilustrada na figura 2.

Fonte: <http://www.fisica.ufjf.br/~cralima/index_arquivos/LabFisMod/Labfismod.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2018.

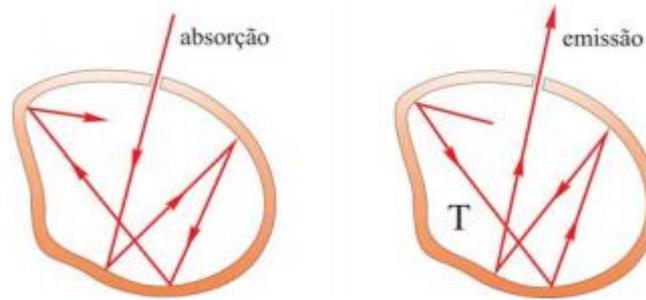


Figura 2 – Cavidade ressonante que se comporta como um corpo negro ideal.

A caixa deve ser revestida de um excelente isolante térmico e espelhado internamente, refletindo toda radiação eventualmente incidente, exceto na abertura. A radiação, que entra na caixa tem uma possibilidade muito pequena de escapar, permanecendo assim em seu interior ($a_N = 1$) e sendo espalhada pelas paredes da cavidade até atingir o equilíbrio térmico. Desta maneira, toda radiação incidente é absorvida pelo corpo. Quando, agora, o corpo for aquecido à temperatura T , estas paredes emitem radiação eletromagnética, cuja maior parte permanece no interior da cavidade. Desta maneira, após reflexões sucessivas, a energia da radiação emitida pelas paredes é igual à absorvida. Tal cavidade é uma aproximação de um corpo negro e, ao ser aquecida, o espectro da radiação do buraco é contínuo, e não depende do material da cavidade. Por um teorema provado por Kirchhoff, o espectro observado depende apenas da temperatura das paredes da cavidade. A Lei de Kirchhoff nos diz que num corpo negro ideal, em equilíbrio termodinâmico a temperatura T , a radiação total emitida deve ser igual à radiação total absorvida.

Definindo o ângulo θ que raio de luz saindo do corpo negro faz com a direção horizontal. Então a potência por unidade de área (intensidade) da radiação de densidade de energia média u que escapa pelo orifício de uma cavidade na direção de um ângulo θ , segundo um ângulo sólido $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$, é dada segundo a expressão

$$dI = uc \cos\theta \frac{d\Omega}{4\pi} \rightarrow I = \frac{uc}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \sin\theta \cos\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi,$$

integrando em um hemisfério, ficaremos com

$$I = \frac{uc}{4}. \quad (1.5)$$

Vamos definir por $R(T, \nu)$ a intensidade da radiação ($I = R$) por unidade de frequência e $\rho(T, \nu)$ a densidade de energia (u) por unidade de frequência, de modo que teremos as seguintes relações:

$$\begin{cases} R = \int_0^{\infty} R(\nu, T) d\nu \\ u = \int_0^{\infty} \rho(\nu, T) d\nu \end{cases}, \quad (1.6)$$

logo, usando a relação (1.5) e as definições (1.6), obtemos

$$R(\nu, T) = \frac{c}{4} \rho(\nu, T). \quad (1.7)$$

As primeiras medidas precisas de $\rho(\nu, T)$ foram feitas, em 1899, por Lummer e Pringshein, que utilizaram um instrumento basicamente semelhante aos espectrômetros de prismas, usualmente empregados na medida de espectros ópticos. A diferença é que materiais especiais foram então utilizados a fim de se ter lentes, prismas, etc, transparentes aos grandes comprimentos de onda da radiação térmica. Como resultado destas pesquisas foi verificado que a forma da função $\rho(\nu, T)$ é universal, independe da forma, tamanho ou composição química do corpo. Este aspecto universal do espectro do corpo negro foi primeiramente apontado por Kirchhoff, em 1859, baseado na termodinâmica e eletromagnetismo.

Na figura 3, apresentamos o comportamento da densidade de energia espectral, $u(\lambda, T)$, em função do comprimento de onda [$u(\nu, T) d\nu = -u(\lambda, T) d\lambda$] do corpo negro à temperatura de 1500 K, onde observamos a densidade máxima em torno do comprimento de onda $\lambda_{max} \sim 2\mu m$. A fim de comparação, e iremos discutir mais adiante, apresentamos para fins de comparações os resultados teóricos obtidos pelas leis de Wien e Rayleigh-Jeans, assim como a solução de Planck. Como bem observado, a solução de Planck reproduz com exatidão os dados experimentais.

Fonte: <<http://www.fisica.net/resolvidos/resolucoes/18.xht>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

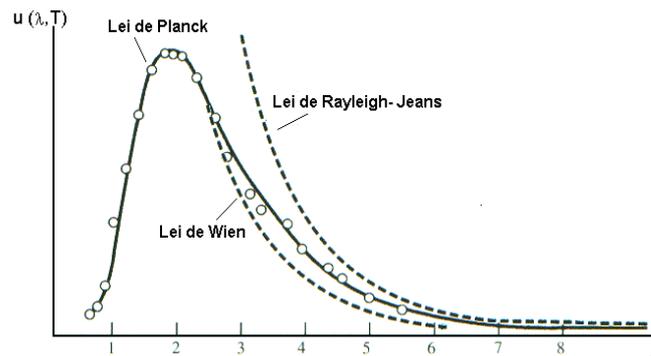


Figura 3 – Espectro da radiação de um corpo negro na temperatura de 1500K (pontos), e comparamos com as curvas teóricas da teoria de Planck (linha contínua), lei de Wien (linha tracejada) e lei de Rayleigh-Jeans (linha pontilhada).

O grande objetivo no início do século XX era a obtenção da função universal $\rho(\lambda, T)$ ou $\rho(\nu, T)$, diante disso duas leis, relativas a dependência da radiação do corpo negro com a temperatura, foram propostas:

1) A partir de resultados experimentais de Tyndall, em 1864, de que a emissão total de um fio de platina a 1200 °C é 11,7 vezes maior que a correspondente emissão a 525 °C. Desta maneira, Josef Stefan concluiu, em 1879, que a energia total é proporcional à quarta potência da temperatura (isto é, $u \sim T^4$), baseado no simples argumento da seguinte relação matemática³:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{1200+273}{525+273} \right) \simeq 1,8 \rightarrow \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^4 = 1,8^4 \simeq 11,7 \quad (1.8)$$

Este resultado fortuito, uma vez que Tyndall mediu uma radiação que estava longe de ser a de um corpo negro, foi demonstrado rigorosamente por Ludwig Boltzmann, em 1884, baseando-se na existência de uma pressão de radiação, e sujeitando a radiação às leis da termodinâmica. Desde então ficou conhecida como a lei de Stefan-Boltzmann.

2) Analisando o espectro da radiação para diversos valores de temperatura, foi anotado por Wien, em 1893, que a densidade de energia atinge um máximo num dado valor de comprimento de onda, λ_{max} , e que este valor diminui à medida que aumentamos a temperatura (ver figura 4), ou seja,

$$\lambda_{max} T = b, \quad (1.9)$$

³ Ver o trabalho original de J. Stefan: *Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur, Wiener Berichte* **79**, 391 (1879).

onde $b = (0,2897756 + 0,0000024) \text{ cm.K}$. A Eq. (1.9) ficou conhecida como a lei do deslocamento de Wien⁴. A densidade espectral também pode ser obtida em função da frequência, logo a lei de Wien será dada por

$$\frac{\nu_{max}}{T} = a, \quad (1.10)$$

onde $a = 1,03 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}/\text{K}$.

Fonte: P. S. Guimarães, Radiação de Corpo Negro, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 2, Junho, 1999.

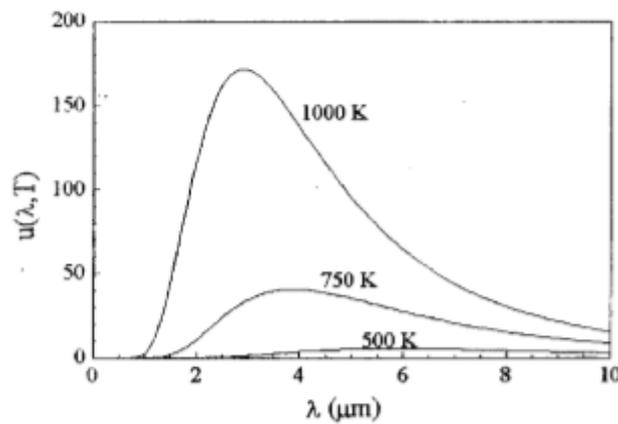


Figura 4 – Densidade de energia espectral $u(\lambda, T)$, em função do comprimento de onda λ , da radiação de um corpo negro para diversos valores de temperatura.

Baseado nas duas leis acima, em 1893, Wien propôs que a densidade espectral $\rho(\nu, T)$ da radiação do corpo negro para ser uma função universal deveria ter a seguinte forma⁵

$$\rho(\nu, T) = \nu^3 \Phi\left(\frac{\nu}{T}\right), \quad (1.11)$$

onde $\Phi(x)$ é uma função universal dependente da razão ν/T .

Para chegar ao resultado (1.11) Wien admitiu que a densidade de energia, u , é proporcional a quarta potência da temperatura (lei de Stefan-Boltzmann), logo da relação (1.6), ficaremos com

⁴ Ver o trabalho original de Wien: *Ein neue Beziehung der Strahlung scharzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmertheorie. Königlich Preussische Akademic der Wissenschaften (Berlin) Sitzungsberichte* (9 de fevereiro) 55 (1893).

⁵ Para uma discussão histórica sobre radiação do corpo negro ver o trabalho de Feldens, Dias e Santos, *E assim se fez o quantum... na Rev. Bras. Ensino Fís.* **32**, 2602 (2010), onde esta relação universal foi deduzida formalmente.

$$u = \int_0^{\infty} v^3 \Phi\left(\frac{v}{T}\right) dv = T^4 \int_0^{\infty} x^3 \Phi(x) dx, \quad (1.12)$$

que usando a relação (1.7), ficaremos com

$$R = \sigma T^4, \quad (1.13)$$

onde a constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = (5,67051 \pm 0,00019) \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{K}^4$ é obtida experimentalmente.

Do ponto de vista teórico, comparando os resultados (1.13) com (1.12), teremos

$$\sigma = \frac{c}{4} \int_0^{\infty} \Phi x^3(x) dx, \quad (1.14)$$

onde a função universal $\Phi(x)$ não é conhecida.

3.2 Lei de Stefan-Boltzmann

Em 1884, Boltzmann, ex-estudante de doutorado de Stefan, combinou a primeira e segunda lei da termodinâmica para provar a lei empírica de Stefan ($u \sim T^4$). Usando a relação $p = \frac{u}{3}$ para a pressão de radiação que é conhecida do eletromagnetismo, ficaremos com⁶

$$dQ = TdS = dU + pdV = dU + \frac{u}{3}dV,$$

sendo $U = uV$, reescrevemos a relação acima na forma

$$dS = \frac{V}{T} \left(\frac{du}{dT} \right) dT + \frac{4u}{3T} dV. \quad (1.15)$$

Usando o fato de que a entropia é uma função da temperatura e volume, $S(T, V)$, e é uma diferencial exata, então teremos

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T dV, \quad (1.16)$$

⁶ Ver o trabalho original de Boltzmann: *Ableitung des Stefan'schen Gesetzes betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie. Widemannsche Annalen der Physik* **22**, 291 (1884).

comparando (1.15) e (1.16), identificamos

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V = \frac{V}{T} \left(\frac{du}{dT}\right) \\ \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \frac{4u}{3T} \end{cases}, \quad (1.17)$$

sendo a entropia uma diferencial exata, então temos a seguinte propriedade para as derivadas parciais cruzadas:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial T \partial V} = \frac{\partial^2 S}{\partial V \partial T}. \quad (1.18)$$

Substituindo (1.17) em (1.18), obtemos

$$-\frac{4u}{3T^2} + \frac{4}{3T} \frac{du}{dT} = \frac{1}{T} \frac{du}{dT} \rightarrow \frac{du}{dT} = 4 \frac{u}{T}, \quad (1.19)$$

integrando, encontramos

$$u \simeq T^4. \quad (1.20)$$

A lei de Stefan-Boltzmann (1.13) foi testada e confirmada em 1897 por diversos pesquisadores, como, por exemplo, Paschen, Lummer, Pringheim, Mendenhall, Saunders e vários outros da época.

3.3 Leis Clássicas

A lei de Stefan-Boltzmann (1.13), demonstrada teoricamente por Boltzmann, usando o eletromagnetismo clássico e a termodinâmica, foi amplamente reproduzida experimentalmente por diversos pesquisadores, e é considerada uma lei fundamental para o corpo negro (e também para radiação térmica).

3.3.1 2ª Lei de Wien

O sucesso da lei de Stefan-Boltzmann motivou bastante a procura da função universal $\Phi(x)$ presente na equação (1.11), que reproduzisse a lei de Stefan-Boltzmann. Desta maneira, Wien recorre a um modelo para o corpo radiante fazendo a hipótese (absurda) de que, de certa forma, a radiação do corpo negro se comporta como um gás

que satisfaz a distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann⁷. Wien, em 1896, assumiu a seguinte expressão para a função $\Phi(x)$:

$$\Phi(v, T) = A \exp\left(-\frac{Bv}{T}\right), \quad (1.21)$$

onde A e B são constantes ajustáveis com os dados experimentais.

Substituindo (1.21) na expressão (1.11), ficaremos com

$$\rho(v, T) = Av^3 \exp\left(-\frac{Bv}{T}\right). \quad (1.22)$$

Mesmo sendo muito *ad hoc* a proposta da expressão (1.22) para a densidade de energia espectral do corpo negro (2ª lei de Wien), este resultado teve o mérito incontestável de reproduzir corretamente a lei do deslocamento de Wien e a lei de Stefan-Boltzmann. Esta expressão foi deduzida termodinamicamente por Planck em 1899.

Usando o fato de que $\lambda = c/v$ então $d\lambda = -cdv/v^2$, que significa o aumento da frequência ν correspondente a uma diminuição no comprimento de onda λ , e vice-versa. Podemos encontrar a partir da relação (1.11) uma expressão para a densidade de energia espectral como uma função do comprimento de onda e temperatura, ou seja, $\rho(\lambda, T)$. Para tanto, usamos a proporcionalidade entre as densidades $\rho(v, T)$ e $\rho(\lambda, T)$ dada por

$$\rho(v, T)dv = -\rho(\lambda, T)d\lambda \rightarrow \rho(v, T) = -\rho(\lambda, T)\frac{d\lambda}{dv},$$

substituindo $v = c/\lambda$ e $\frac{d\lambda}{dv} = -\frac{c}{v^2} = -\frac{\lambda^2}{c}$, ficaremos com

$$\left(\frac{c}{\lambda}\right)^3 \Phi\left(\frac{c}{\lambda T}\right) = -\rho(\lambda, T)\left(\frac{-\lambda^2}{c}\right),$$

logo

$$\rho(\lambda, T) = \frac{1}{\lambda^5} \tilde{\Phi}(\lambda T), \quad (1.23)$$

sendo

⁷ Ver o trabalho de W. Wien: Über die Energievertheilung im Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers. Wiedmannsche Annalen de Physik **58**, 662 (1896).

$$\tilde{\Phi}(\lambda T) = c^4 \Phi\left(\frac{c}{\lambda T}\right), \quad (1.24)$$

uma outra função universal.

Substituindo a função de Wien (1.21) na expressão (1.23), obtemos a densidade de energia espectral por

$$\rho(\lambda, T) = \frac{Ac^7}{\lambda^8} \exp[-Bc/\lambda T]. \quad (1.25)$$

Da expressão geral (2.23) temos que se traçarmos um gráfico $\lambda^5 \rho(\lambda, T)$ versus $x = \lambda T$, as curvas para diversos valores de temperaturas colapsam numa única curva $\tilde{\Phi}(x)$. Esta universalidade confirma a lei de Wien, e isto deu grande motivação aos teóricos da época (~1900) à procura da função $\Phi(x)$ partindo dos primeiros princípios.

3.3.2 Explicação da 2ª lei de Wien

A existência de **dipolos oscilantes** (carga acelerada), segundo a teoria de Maxwell, emite radiação eletromagnética. Este problema foi estudado experimentalmente por Heinrich Hertz em 1889, confirmando a existência das ondas eletromagnéticas de Maxwell. Este mesmo problema dos dipolos oscilantes foi também estudado por Planck entre 1895 e 1900 a fim de deduzir uma relação entre a densidade de energia espectral $\rho(\nu, T)$ e a energia média de um oscilador $\langle \mathcal{E} \rangle$. Planck, em 1900, calculou a potência emitida e absorvida por ressonadores magnéticos (contínuo de energia), obtendo⁸

$$\begin{cases} P_{emitida} = \frac{8\pi e^2 \nu^2}{3mc^3} \langle \mathcal{E} \rangle \\ P_{absorvida} = \frac{\pi e^2}{3m} \rho(\nu, T) \end{cases}. \quad (1.26)$$

No equilíbrio térmico teremos $P_{emitida} = P_{absorvida}$, logo, da Eq. (1.26), encontramos

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \langle \mathcal{E} \rangle. \quad (1.27)$$

Esta relação (1.27) é puramente clássica, baseada apenas no uso do eletromagnetismo de Maxwell. Como a radiação e os osciladores estão em equilíbrio, a

⁸ Este resultado foi um dos primeiros trabalhos de Planck relacionado com a radiação do corpo negro, publicado em *Ann. Physik* 1, 99 (1900), e está bastante detalhado a sua solução no livro de *Física Moderna: Origens clássicas e fundamentos quânticos*, Caruso e Oguri (Elsevier-2006), pag. 316.

frequência ν tem duplo significado: representa a frequência da radiação incidente ou correspondente a frequência dos modos de oscilação dos átomos na parede da cavidade.

Planck considerou n ressonadores iguais, com uma energia média $\langle \mathcal{E} \rangle$, mas os ressonadores individuais podiam ter energias maiores ou menores do que $\langle \mathcal{E} \rangle$. Desta maneira, calculou a relação entre mudança de energia e mudança de entropia utilizando o modelo:

$$\frac{d^2 S}{d\langle \mathcal{E} \rangle^2} = -\frac{\alpha}{\langle \mathcal{E} \rangle} \rightarrow \frac{dS}{d\langle \mathcal{E} \rangle} = -\alpha \ln \gamma \langle \mathcal{E} \rangle = \frac{1}{T}. \quad (1.28)$$

Essa equação, deduzida do modelo, foi combinada com a relação termodinâmica, resultando em

$$\langle \mathcal{E} \rangle = A \exp(-1/\alpha T), \quad (1.29)$$

Relacionando essa relação (1.29) com a Eq. (1.27), e combinando com a condição do deslocamento de Wien, Planck obteve a 2ª lei de Wien (1.22) escolhendo $\alpha = B\nu/k_B$. Até o início de 1900, a principal contribuição de Planck à teoria do corpo negro era ter “provado” a lei de Wien, que antes se baseava em uma analogia com a distribuição de Maxwell-Boltzmann. Planck acreditava que a lei de Wien era a única compatível com a termodinâmica e o eletromagnetismo.

3.3.3 Teoria de Rayleigh-Jeans

Em 1899, Planck provou um teorema bastante importante que estabelece uma relação entre a densidade de energia espectral $\rho(\nu, T)$ e a energia média $\langle \mathcal{E} \rangle$ de um oscilador (oscilação do campo)⁹. A forma por ele deduzido foi considerar dipolos de Hertz oscilantes, vamos a seguir fazer uma dedução diferente. Seja dentro da cavidade uma onda eletromagnética com comprimento de onda λ e frequência ν , cujo campo elétrico é dado por

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}, \quad (1.30)$$

onde \vec{E}_0 é a amplitude do campo elétrico, $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda e $\omega = 2\pi\nu = kc$.

⁹ Para a dedução de Planck para o número de modos de vibração dos osciladores, ver o livro do Caruso e Oguri, Física Moderna, pag. 316, neste livro temos seguido os cálculos de Rayleigh do confinamento da onda eletromagnética dentro da cavidade.

Considere uma caixa cúbica de volume $V = L^3$, de modo que o campo elétrico oscilante fica dentro desta cavidade cúbica. Usando a condição de contorno periódica, teremos

$$\begin{cases} \vec{E}(x + L, y, z, t) = \vec{E}(x, y, z, t) \\ \vec{E}(x, y + L, z, t) = \vec{E}(x, y, z, t) \\ \vec{E}(x, y, z + L, t) = \vec{E}(x, y, z, t) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} k_x L = 2n_x \pi \\ k_y L = 2n_y \pi, n_\mu = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \\ k_z L = 2n_z \pi \end{cases} \quad (1.28)$$

Sendo $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{2\pi v}{c}\right)^2$ descrevendo a equação de uma esfera de raio $R = \frac{2\pi}{c} v$ no espaço \vec{k} , vamos então calcular o número de modos de vibração desta onda dentro de uma caixa de volume $V=L^3$. Para isto, pegamos o volume da esfera, $\frac{4\pi}{3} R^3$, e dividimos pelo volume de um estado $\Delta k_x \Delta k_y \Delta k_z = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^3$, ou seja,

$$\mathcal{N}(v) = \frac{\frac{4\pi}{3} \left(\frac{2\pi v}{c}\right)^3}{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3} = \frac{4\pi}{3} \frac{V}{c^3} v^3. \quad (1.29)$$

A densidade de estado por unidade de volume será obtida por derivação da Eq. (1.29), resultando em

$$\mathcal{D}(v) = \frac{1}{V} \frac{d\mathcal{N}(v)}{dv} = \frac{4\pi}{c^3} v^2. \quad (1.30)$$

Levando em consideração os dois modos de polarização da onda eletromagnética, devemos então multiplicar o resultado (1.30) por um fator dois. A densidade de energia espectral é obtida multiplicando esta densidade de estado pelo valor médio de um oscilador, ficando com

$$\rho(v, T) = \mathcal{D}(v) \langle \mathcal{E} \rangle = \frac{8\pi v^2}{c^3} \langle \mathcal{E} \rangle. \quad (1.31)$$

Planck primeiro obteve o valor médio $\langle \mathcal{E} \rangle$ usando argumentos puramente termodinâmico¹⁰ (*ad hoc*), mas a comunidade científica não aceitou de imediato a expressão encontrada por Planck, mesmo tendo conseguido reproduzir com grande exatidão os resultados experimentais da época. Anos depois fazendo uso de análise

¹⁰ Para a dedução termodinâmica feita por Planck na época para o valor médio $\langle \mathcal{E} \rangle$ recomendo ao leitor ver o livro do Caruso e Oguri, *Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos*, pag. 321. Uma boa discussão histórica sobre a radiação do corpo negro pode ser encontrada no artigo do Guimarães, publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física **Vol. 21**, 291 (1999).

combinatórias, ele calculou o número de microestados que N osciladores quânticos podem ter com energia total E .

Ajustando adequadamente as constantes A e B na expressão (1.25) com os dados experimentais, na figura 3 observamos que os resultados são insatisfatórios na região de baixos (altas) comprimentos de ondas (frequência), portanto, não descreve corretamente todo o espectro da radiação do espectro do corpo negro.

Em uma curta nota, publicada em junho de 1900, Rayleigh¹¹ aplicou a mecânica estatística de Maxwell-Boltzmann para encontrar o valor médio da energia $\langle \mathcal{E} \rangle$ na Eq. (1.27). Usando o teorema da equipartição da energia para as oscilações da radiação na cavidade, isto é, $\langle \mathcal{E} \rangle = k_B T$, Rayleigh encontrou

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi k_B T \nu^2}{c^3} \quad (1.35)$$

Na realidade Rayleigh obteve a expressão (1.35) multiplicada pelo fator 1/2. Seu método consistia em calcular o número de ondas estacionárias¹², ou seja, a distribuição de modos eletromagnéticos permitidos com frequência no intervalo entre ν e $\nu + d\nu$. Na verdade, Rayleigh havia cometido um engano numérico na sua dedução, esqueceu de colocar as duas (fator 2) formas de polarização da luz. Isto só foi detectado em 1905, pelo astrônomo inglês James Jeans. Depois disso, a equação ficou conhecida como Rayleigh-Jeans.

Em função do comprimento de onda, da Eq. (1.35), encontramos

$$\rho(\lambda, T) = -\rho(\nu, T) \frac{d\nu}{d\lambda},$$

sendo $\nu = c/\lambda$ e $d\nu/d\lambda = -c/\lambda^2$, ficaremos com

$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi k_B T}{\lambda^4} \quad (1.36)$$

Este resultado clássico (1.36) quando comparado com os dados experimentais, conforme mostrado na figura 3, é adequado na região de altos (baixos) comprimentos de

¹¹ Este trabalho foi publicado em Phil. Mag. 49, 539 (1900).

¹² Para detalhes desta demonstração recomendamos o livro de *Física Quântica, átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas* de Eisberg e resnick (Editora Campus-RJ, 1985) na página 24.

onda (frequência) e observamos que no limite $\lambda \rightarrow 0$ esta expressão diverge, e que ficou conhecida como catástrofe do ultravioleta, expressão cunhada pelo físico austríaco Paul Ehrenfest, em 1911.

3.4 Teoria de Planck

Em outubro de 1900, Rubens e Kurbaum fizeram novas medidas contrárias à lei de Wien e avisaram a Planck dos seus resultados, antes de divulgá-los. Para altos comprimentos de onda e altas temperaturas, a densidade de energia era proporcional à temperatura, em concordância com a lei de Rayleigh. A experiência mostrava que a lei de Wien estava errada (ou correta numa certa região).

Como Planck havia “provado” que ela era a única alternativa válida, ele procurou rapidamente verificar se havia algum ponto da sua dedução antiga que poderia ser mudado. O ponto crucial da dedução, que não dependia diretamente do eletromagnetismo nem da termodinâmica geral, mas de um modelo de ressonadores, era o que levava à Eq. (1.28).

3.4.1 Explicação termodinâmica

Se a densidade de energia fosse proporcional à temperatura, como a experiência parecia mostrar no limite de altas temperaturas e baixas (altas) frequências (comprimento de onda), então a energia média dos ressonadores também deveria ser proporcional à temperatura, como usado por Rayleigh do teorema da equipartição da energia.

Na sua dedução, Planck não fez menção ao trabalho de Rayleigh, mas certamente conhecia, pois fora publicado da prestigiosa revista alemã *Philosophical Magazine*, e Rubens, na sua visita domiciliar de 7 de outubro de 1900, lhe comunicou que para baixas frequências o resultado teórico observado seria a fórmula de Rayleigh.

Usando a relação termodinâmica:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial E}\right)_V = (\partial s / \partial \mathcal{E})_V = \frac{1}{T}, \quad (1.37)$$

e o fato de que na região de baixas frequências temos $\mathcal{E} \sim T$, então da relação acima, teremos

$$\frac{dS}{d\mathcal{E}} \simeq \frac{1}{\mathcal{E}} \rightarrow \frac{d^2 S}{d\mathcal{E}^2} \simeq -\frac{1}{\mathcal{E}^2}, \quad (1.38)$$

que corresponde o comportamento da concavidade da entropia na teoria de Rayleigh.

Na região de altas frequências temos o comportamento da energia do tipo dado pela Eq. (1.29) e, conseqüentemente, teremos (ver Eq. (1.28))

$$\frac{d^2S}{d\varepsilon^2} \simeq -\frac{1}{\varepsilon}. \quad (1.39)$$

Dos dois resultados acima teremos os comportamentos da concavidade da entropia resumida

$$\frac{d^2S}{d\varepsilon^2} = \begin{cases} -\frac{b}{\varepsilon^2} (\nu \rightarrow 0) \\ -\frac{a}{\varepsilon} (\nu \rightarrow \infty) \end{cases} \quad (1.40)$$

onde Planck fez uma interpolação entre as duas equações, e propôs

$$\frac{d^2S}{d\varepsilon^2} = \frac{a}{\varepsilon(\varepsilon+b)} = -\frac{a}{b} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon+b} \right), \quad (1.41)$$

de tal maneira que

$$\begin{cases} \lim_{\nu \rightarrow 0} b = 0 \\ \lim_{\nu \rightarrow \infty} b = \infty \end{cases} \rightarrow b \simeq \nu, \quad (1.42)$$

onde a é uma constante.

Integrando a Eq. (1.41) e usando a relação termodinâmica (1.37), obtemos

$$\frac{dS}{d\varepsilon} = -\frac{a}{b} (\ln \varepsilon - \ln(\varepsilon + b)) = -\frac{a}{b} \ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon+b} \right) = \frac{1}{T}, \quad (1.43)$$

isolando o valor da energia em (1.43), ficaremos com

$$\varepsilon \rightarrow \langle \varepsilon \rangle = \frac{b}{\exp\left(\frac{b}{aT}\right) - 1}. \quad (1.44)$$

Substituindo (1.44) na relação de Planck (1.27), obtemos

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{b}{\exp\left(\frac{b}{aT}\right) - 1}, \quad (1.45)$$

onde $b = h\nu$ e $a = k_B$ que Planck denominou-a de constante de Boltzmann.

Substituindo as constantes a e b , Eq. (1.46), na expressão (1.45), ficaremos com

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \quad (1.47)$$

onde h e k_B são constantes ajustáveis com os dados experimentais, denominados respectivamente de constantes de Planck e Boltzmann. Nos seus ajustes, Planck obteve os valores $h = 6,55 \times 10^{-34}$ J.s e $k_B = 1,346 \times 10^{-11}$ J/K.

Essa equação foi apresentada à sociedade Alemã de Física no dia 19 de outubro de 1900, como um comentário ao trabalho experimental de Rubens e Kurlbaum. Nesse primeiro trabalho, muito curto e escrito às pressas, Planck não apresentou nenhuma justificativa teórica de sua fórmula da radiação do corpo negro. O único aspecto positivo dessa primeira comunicação era que Planck havia chegado a uma equação que satisfazia as medidas experimentais. Rubens confirmou a concordância pouco depois, Lummer e Pringsheim também. Durante 8 semanas seguintes, Planck procurou justificar sua equação.

3.4.2 Explicação estatística

Ao mesmo tempo que Planck apresentou à comunidade científica a expressão (1.47) para descrever a radiação do corpo negro, ele também deduziu a partir da Eq. (1.43) uma expressão para a entropia que é dada por

$$S(\mathcal{E}) = Nk_B \left[\left(1 + \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_o}\right) \ln \left(1 + \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_o}\right) - \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_o} \ln \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_o} \right], \quad (1.48)$$

onde $S = Ns$ e $\mathcal{E}_o = h\nu$. Esta expressão para a entropia necessitava de uma fundamentação teórica.

A fim de calcular a expressão da entropia, definida pela equação de Boltzmann $S = k_B \ln \Omega$, Planck precisou obter o número total de configurações microscópicas Ω . No seu modelo, a energia total E de um conjunto de N osciladores idênticos, onde admitiu que as M células de energia $\mathcal{E}_o = E/M$ seriam indistinguíveis. Planck esperava que, no final dos cálculos, pudesse fazer os elementos de energia \mathcal{E}_o tenderem a zero. No entanto, o valor de h não podia tender a zero. No dia 14 de dezembro de 1900, Planck apresentou um segundo trabalho à sociedade Alemã de Física¹³, onde deduziu a Eq. (1.48)

¹³ Este segundo trabalho de Planck foi publicado em *Ann, Phys.* 4, 553 (1901).

Para obter Ω Planck usou a ideia de análise combinatória, onde distribuiu M bolas idênticas em $N-1$ divisórias (Boltzmann-1877). O número total de objetos é $M+N-1$, então devemos misturá-lo, que em análise combinatória corresponde a permutação $(M+N-1)!$. Por outro lado, a permuta das bolas $M!$ e das divisórias $(N-1)!$ não alteram a configuração microscópica do sistema, e na análise combinatória corresponde a uma divisão sobre todas as permutações dos *objetos*, assim sendo, obteremos

$$\Omega = \frac{(M+N-1)!}{M!(N-1)!}. \quad (1.49)$$

Sendo $M, N \gg 1$, então usando a aproximação de Stirling $N! = N^N e^{-N}$ e $M! = M^M e^{-M}$ na Eq. (1.49) e usando a expressão de Boltzmann, obtemos

$$S = k_B [(N + M) \ln(N + M) - N \ln N - M \ln M],$$

Fazendo algumas manipulações algébricas, ficaremos com

$$S = Nk_B \left[\left(1 + \frac{M}{N}\right) \ln\left(1 + \frac{M}{N}\right) - \frac{M}{N} \ln\left(\frac{M}{N}\right) \right], \quad (1.50)$$

sendo $\frac{M}{N} = \frac{E}{N\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, logo da Eq. (1.50) justificamos a expressão (1.48) obtida por Planck usando a termodinâmica.

Finalmente, vamos partir da equação de Planck (1.47), substituir na Eq. (1.7), e deduzir formalmente a lei de Stefan-Boltzmann (1.13). Usando (1.6), obteremos

$$R = \int_0^\infty \frac{2\pi h v^3}{c^2} \frac{dv}{\exp\left(\frac{hv}{k_B T}\right) - 1},$$

fazendo a mudança de variável $x = \frac{hv}{k_B T}$, ficaremos com

$$R = \frac{2\pi h}{c^2} \left(\frac{k_B T}{h}\right)^4 \overbrace{\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{\exp(x) - 1}}^{\frac{\pi^4}{15}} = \sigma T^4, \quad (1.51)$$

Sendo a constante de Stefan-Boltzmann dada por

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3}, \quad (1.52)$$

onde na época h e k_B eram constantes desconhecidas, mas σ tinha sido determinada com certa precisão.

Para se determinar k_B e h , Planck recorreu a uma outra relação que foi a lei do deslocamento de Wien, Eq. (1.9). Transformando primeiro a distribuição de energia espectral (1.47) para a variável comprimento de onda, lembrando que $\rho(\lambda, T) = -\rho(\nu, T) \frac{d\nu}{d\lambda}$, obtemos

$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}, \quad (1.53)$$

derivando esta expressão em relação a λ e igualando a zero (ponto de máximo), encontramos

$$5[1 - \exp(-x)] = x, \quad (1.54)$$

onde $x = \frac{hc}{\lambda_{max} k_B T}$.

Resolvendo a Eq. (1.54) numericamente, encontramos a raiz $x_o = 4,965$. Logo, da lei de Wien obtemos uma equação em função de h e k_B dada por

$$\lambda_{max} T = \frac{hc}{x_o k_B} b = 0,290 \text{ cm.K}, \quad (1.55)$$

Resolvendo simultaneamente as Eqs. (1.52) e (1.55), usando o valor preciso da constante $\sigma = 5,671 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ K}$, obtemos

$$\begin{cases} k_B = 1,346 \times 10^{-23} \text{ J/K} \\ h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s} \end{cases} \quad (1.56)$$

3.5 Consolidação dos quantum de energia

Planck não estava tão certo¹⁴ da suposição de que a energia E é um múltiplo inteiro de uma quantidade \mathcal{E}_o . O que significa então a quantização da energia para Planck nessa época? Primeiramente, em 1900, Planck não supôs que a energia de cada ressonador fosse

¹⁴ Uma boa descrição histórica sobre o quantum de energia pode ser vista no trabalho do Prof. Nelson Studart na Rev. Bras. Ens. Fis. 22, 523 (2000).

igual a $nh\nu$, ou seja, não quantizou a energia de cada oscilador, como é descrito na maioria dos livros textos¹⁵.

O que, então, estava quantizada na teoria inicial de Planck? i) Radiação: **não**; ii) Energia dos ressonadores: **não**; iii) Trocas de energia: **não**. Os elementos de energia \mathcal{E}_o eram apenas um “truque” para chegar ao resultado correto e não receberam interpretação, inicialmente (discretização da energia). Posteriormente, Planck declarou que a introdução dos elementos de energia foi “um ato de desespero”, e que “era preciso dar uma explicação teórica (para a equação do corpo negro) a qualquer custo, fosse qual fosse o preço”.

O trabalho de Planck teve pequena repercussão nos anos seguintes. i) Teoria do corpo negro foi testada e confirmada: funciona; ii) Dedução teórica não foi muito comentada; iii) A introdução dos elementos de energia parecia um truque sem importância física. Lorentz criticou o trabalho de Planck, entre 1902 e 1903: i) Difícil entender elementos de energia desiguais (dependem da frequência!); ii) Equipartição da energia + mecânica de Hamilton levam à lei de Rayleigh; iii) Planck não tem uma boa base, e contraria a física clássica.

Alguns renomados cientistas da época interpretaram a ideia do trabalho de Planck de maneira diferente, por exemplo, Lorentz, em 1903, interpretou como se ele tivesse afirmado que a energia dos ressonadores só pode aumentar ou diminuir aos saltos. Ehrenfest, em 1905, interpretou como se ele tivesse afirmado que a energia radiante é dividida em elementos iguais $\mathcal{E}_o = h\nu$.

Em 1905, Einstein publicou uma sugestão sobre a existência de *quanta* de luz. Não se baseou na lei de Planck do corpo negro, utilizou o limite de Wien, e mostrou que ele era compatível com a hipótese de um “gás” de partículas de luz (mais tarde chamado de gás de fótons). Em 1877, Boltzmann mostrou que a variação da entropia de um gás ideal é dada por

$$\Delta S = S - S_o = Nk_B \ln(V/V_o), \quad (1.57)$$

note que a constante de Boltzmann k_B só foi introduzida em 1900 por Planck, aqui apenas atualizamos na expressão acima.

¹⁵ No livro de Física Quântica do Eisberg e Resnick, página 37, o autor determina a expressão da energia média $\langle \mathcal{E} \rangle$ de maneira como Einstein fez em 1907 para descrever o sólido [ver Ann. Der Phys., 22, 180 (1907) e Rev. Bras. Ens. Fis. 27, 63 (2005)]. Vários outros livros têm cometido este erro histórico na descrição teórica do cálculo da radiação do corpo negro por Planck.

Partindo da lei de Wien da radiação, Einstein obteve a entropia da radiação (semelhante a obtida por Planck em 1898) dada por

$$\Delta S = S - S_o = (u/av)\ln(V/V_o), \quad (1.58)$$

comparando as expressões (1.57) e (1.58), Einstein concluiu que a energia da radiação é quantizada na forma

$$\frac{u}{av} = Nk_B \rightarrow u = Nh\nu. \quad (1.59)$$

Einstein não utilizou o nome **fóton**, foi sugerido em 1926 por Lewis, e não utilizou a equação $E = h\nu$, e assim a expressão $E = (R/N_a)\beta\nu$, onde $k_B = R/N_a$ e $\beta = h/k_B$. O trabalho de Einstein não foi levado a sério, pois não podia explicar fenômenos ondulatórios da luz: interferência, difração e polarização. O único outro autor que utilizou a ideia dos quanta de luz foi Stark, em 1907. Stark também sugeriu que a equação $E = h\nu$ se aplica a tudo, e que um elétron, com massa de repouso m_o tem uma frequência de vibração

$$\nu = m_o c^2 / h. \quad (1.60)$$

Mais de dez anos depois, Louis de Broglie usou uma ideia semelhante como ponto de partida de sua mecânica ondulatória.

Em 1906, Einstein e Ehrenfest discutiram a dedução de Planck sobre o espectro do corpo negro e mostraram que se não fosse introduzida uma descontinuidade na energia dos ressonadores, seria obtida a lei de Rayleigh-Jeans. Apontaram que o trabalho de Planck era inconsistente pois supunha que a absorção e a emissão de energia eram contínuas. No mesmo ano Max von Laue afirmou que não era necessário supor que a energia dos ressonadores fosse descontínua, bastava supor que a troca de energia era descontínua. A partir de um trabalho de Planck em 1906, Lorentz, em 1908, percebe que os ressonadores recebiam e emitiam energia de forma contínua.

Em 1819, Pierre Louis Dulong e Alexis Thérèse Petit mostraram que o produto do calor específico pelo peso atômico de vários elementos sólidos parecia constante (3R). Com o desenvolvimento de técnicas de baixas temperaturas foi observado nos sólidos que o calor específico não se mantém constante, segundo a lei de Dulong-Petit, mas começa a decrescer monotonicamente com o decréscimo da temperatura, indo a zero quando $T \rightarrow$

0 (3ª lei da termodinâmica). Este era um dos grandes problemas teórico no início do século XX a ser resolvido, assim como foi o caso da radiação.

Em 1907, Einstein publicou uma teoria sobre o calor específico dos sólidos. Supôs que as partículas dos sólidos vibravam (MHS) com energias múltiplas do elemento de energia: $E = n(R\beta/N)v$ (não utilizava h , mas isso é equivalente a $E = nhv$, onde hv é o quantum de energia de vibração da rede (fônion). Vale salientar que Einstein em 1906 usou diretamente a expressão de Planck dos osciladores para descrever os sólidos, e somente em 1907 que fez a dedução formal, obtendo a mesma expressão de Planck para a energia média de um conjunto de osciladores em três dimensões, que é dada por¹⁶

$$\langle \mathcal{E} \rangle = \frac{3hv}{\exp\left(\frac{hv}{k_B T}\right) - 1}. \quad (1.61)$$

O calor específico é calculado diretamente da Eq. (1.61) por simples derivada em relação a temperatura, ou seja,

$$C_V = \frac{d\langle \mathcal{E} \rangle}{dT} = 3k_B \left(\frac{hv}{k_B T}\right)^2 \left[\frac{\exp\left(\frac{hv}{k_B T}\right)}{\left(\exp\left(\frac{hv}{k_B T}\right) - 1\right)^2} \right]. \quad (1.62)$$

A baixas temperaturas, apenas algumas partículas podem vibrar, e por isso o calor específico depende da temperatura. A teoria previa que o calor específico dos sólidos seria menor do que o previsto pela lei de Dulong-Petit $C_V = 3R$, a baixas temperaturas. Na figura 5 mostramos os resultados experimentais do calor específico do alumínio (Al) e cobre (Cu) em função da temperatura onde comparamos com o resultado (1.62), apresentando realmente uma discrepância, apesar de reproduzir qualitativamente os resultados experimentais.

Em 1912, Peter Debye apresentou uma correção do trabalho de Einstein considerando que o sólido não pode vibrar com qualquer frequência. No seu modelo, foi introduzido um ponto de corte na frequência, que ele chamou de frequência de Debye (w_D) que é uma característica de cada sólido. Desta maneira, definiu-se uma temperatura de Debye $\Theta = \hbar w_D / k_B$ e os resultados teóricos estão em completo acordo com os dados experimentais, conforme pode ser visto na figura 5.

¹⁶ Na dedução de Planck da energia média $\langle \mathcal{E} \rangle$ da radiação, corresponde a um oscilador, enquanto que na teoria de Einstein para o calor específico do sólido, temos que considerar a oscilação dos átomos na rede cristalina nas três direções (independente) espacial, e por esta razão o fator três na Eq. (1.61).

A teoria de Einstein violava o princípio de equipartição da energia e era incompatível com toda a teoria cinética do século XIX. Supunha quantização da energia dos osciladores, que Planck não aceitava nessa época. A concordância experimental era fraca e ninguém deu importância à teoria.

Fonte: <<http://www.portalsaberlivre.com.br/manager/uploads/educacional/1361304430.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

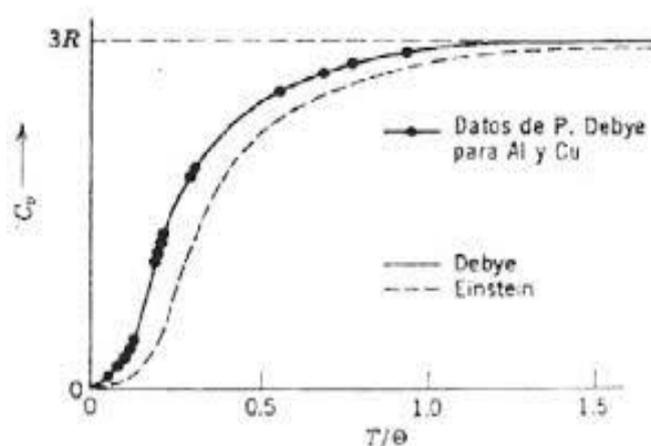


Figura 5 – Calor específico da rede mediante os modelos de Einstein e de Debye, com dados experimentais para Al e Cu.

A situação teórica era muito confusa na época. Em 1908, Lorentz provou que a lei de Rayleigh-Jeans era uma consequência necessária da física clássica. Provou que era necessário introduzir uma descontinuidade da energia para poder chegar à lei de Planck do corpo negro, Planck concordou com Lorentz. Foi somente em 1908 que Planck afirmou pela primeira vez que os ressonadores tinham uma energia descontínua e quantizada na forma $E = nh\nu$, e que essa descontinuidade tinha alguma relação com a natureza dos elétrons. Tanto os elétrons livres quando vibrantes só poderiam trocar energia com o éter em múltiplos de $h\nu$, porém no éter a energia seria contínua (sem quanta de luz-fóton).

Em 1909, Wien aceitou a existência de descontinuidade na energia, portanto violação do eletromagnetismo de Maxwell. Neste mesmo ano, Stark, utilizando uma equação relativística, que relaciona densidade de *momentum* ao fluxo de energia, concluiu que os *quanta* de luz deveriam ter *momentum*, e previu quase 13 anos antes o *efeito Compton*.

Poucas pessoas estavam envolvidas com as questões da quantização da energia em 1910. As pessoas que pesquisavam radiação do corpo negro estavam convencidas de

que era necessário introduzir descontinuidade (mas não estava claro qual descontinuidade). Os “quanta de luz” não eram aceitos porque pareciam incompatíveis com óptica ondulatória. Walther Nerst estudava calor específico de sólidos a baixa temperatura desde 1906, em 1909 citou a teoria de Einstein (primeira citação). Só em 1910 Nerst percebeu que a teoria era revolucionária e comentou suas bases.

A partir do interesse de Nerst, vários pesquisadores começam a estudar teoria do calor específica dos sólidos. Nerst convenceu o químico belga Ernest Solvay a financiar um congresso para discutir a teoria dos *quanta* e da radiação. Entre os dias de 30 de outubro a 3 de novembro de 1911 ocorreu o 1º *Conselho de Solvay* na cidade de Bruxelas, onde estavam as maiores autoridades de física na época (*Goldschmidt, Nerst, Planck, Brillouin, Rubens, Solvay, Sommerfeld, Lindmann, M. de Broglie, Lorentz, Knudsen, Warburg, Perrin, Hasenöhrl, Hostelet, Wien, Herzen, M. Curie, Jeans, Rutherford, Poincaré, Einstein, Langevin, Kammerling-Onnes*). Como consequência deste congresso, concluiu-se: 1) parece ser necessário introduzir algum tipo de descontinuidade (algo variando aos saltos) na física; 2) resultados obtidos são importantes, e não podem ser descritos apenas da física clássica.

Os grandes resultados teóricos naquela época solucionados foram: 1) o problema da radiação (Planck-1900), 2) o efeito fotoelétrico (Einstein-1905) e 3) a descrição do calor específico dos sólidos (Einstein-1907). Todos esses problemas solucionados tinham como base o uso do *quantum* de energia *hν*.

Algumas dúvidas e dificuldades surgiram neste congresso: as deduções misturam partes da física clássica com hipóteses **incompatíveis** com essa física, onde de uma contradição pode-se deduzir qualquer coisa. Talvez as descontinuidades possam ser reduzidas a mudanças contínuas rápidas, e com isto seja necessário alterar as leis mais básicas da física. Poincaré concluiu: a hipótese de Planck é útil, mas envolve grandes dificuldades **incontornáveis**. Impossível prever o futuro dessa teoria.

Quando Planck introduziu a constante *h*, em 1900, ele não sabia o que estava fazendo e 12 anos depois, ainda não se sabia que tipo de coisa deveria ser ou não quantizada: *energia dos osciladores, da radiação ou absorção e emissão de energia*. Independentemente da falta de compreensão teórica, foi sendo construída uma teoria quântica “aleijada”, porque não havia outro modo de tratar alguns fenômenos importantes. No fim, tudo deu certo e resultou na atual mecânica quântica, que todos “compreendem” perfeitamente. Planck foi finalmente agraciado com o prêmio Nobel de

Física, em 1918, pelos seus trabalhos dos *quanta* de energia, e somente em 1921 a academia concedeu o prêmio a Einstein pelo seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico.

O *quantum* de energia $h\nu$ é certamente o resultado mais espetacular na física teórica, pois foi fundamental na explicação de vários experimentos, tais como, *radiação do corpo negro* (1900), efeito fotoelétrico (1905), calor específico dos sólidos (1907), modelo de Bohr (1913), efeito Compton (1922), hipótese de de Broglie (1925), equação de Schrodinger (1926), e deu origem a várias teorias, como segunda quantização (fóton, fônon, magnon, plasmon, etc), eletrodinâmica quântica (1948), teoria de campo-gauge(1954), etc.

4 METODOLOGIA

4.1 Tipo de pesquisa

Este trabalho utilizou a metodologia qualitativa. Segundo Bogdan e Bicklen (1982) a abordagem qualitativa apresenta algumas características básicas, tais como: o ambiente natural como sua fonte direta de dados e o pesquisador como seu principal instrumento; os dados coletados são predominantemente descritivos; a preocupação com o processo é muito maior do que com o do produto; o significado que os participantes dão às coisas e à sua vida são focos de atenção especial pelo pesquisador e análise dos dados tende a seguir um processo indutivo (LÜDKE e ANDRÉ, 1986).

O procedimento de coleta de dados foi realizado através dos registros do diário de campo do professor, das observações do professor e das atividades realizadas pelos alunos as quais citamos: construção de Mapas Conceituais, descrição feita pelos alunos a partir da observação de uma sequência de imagens, questionário e avaliação individual.

4.2 Sujeitos e local da pesquisa

A Sequência Didática desenvolvida foi aplicada no segundo semestre do ano de 2017, mês de novembro, com os estudantes do terceiro ano do Ensino Médio da Escola Estadual de Tempo Integral Senador Petrônio Portela, localizada na zona Centro-Oeste de Manaus-AM. A escola possui regime integral e à turma era oferecida, no período matutino, uma disciplina extra chamada preparação acadêmica, utilizando-se dessa disciplina foi aplicada a SD. Eram disponibilizadas quatro aulas por semana com o tempo de 50 minutos cada e havia 40 alunos matriculados na turma.

4.3 Sequência Didática proposta

Nessa unidade de ensino, desenvolveu-se a Sequência Didática conforme os aspectos de uma UEPS proposto por Moreira para promover a aquisição de novos significados acerca dos conceitos da Radiação do Corpo Negro com aplicação no Ensino Médio. Para isso, contou com os seguintes passos:

- 1. Situação inicial:** explicar a proposta do trabalho à turma, depois apresentar uma sequência de imagens para que os alunos possam observar e interpretar

fisicamente o que representa cada imagem e solicitar que os alunos descrevam suas observações e idéias. O objetivo desse passo é identificar as concepções alternativas e os conhecimentos prévios dos alunos acerca do tema proposto.

2. Situação problema inicial: propor em nível bem introdutório o tema proposto e para isso, propõe-se à turma um vídeo e a leitura de um texto, relacionado ao tema, que servirá de organizador prévio preparando para a inserção dos conceitos que serão estudados, além disso instruir e solicitar a construção de um Mapa Conceitual que será feito em grupo de alunos para que eles possam interagir e trocar idéias sobre os significados adquiridos.

3. Aprofundando conhecimento: apresentar os conceitos da Radiação Térmica, explicando o Corpo Negro, Lei do Deslocamento de Wien, Lei de Planck, a Lei de Stefan e Lei de Rayleigh-Jeans. Será abordado também o gráfico do espectro da radiação, onde discutiremos os fenômenos da Física Clássica e da Física Quântica. Esses conteúdos serão apresentados através de textos e também em slides, sendo estimuladas discussões no grande grupo.

4. Situação problema de aprofundamento: propor atividade no laboratório de informática utilizando-se do recurso computacional e um questionário de apoio. O professor organizará a turma em grupos de alunos dependendo da quantidade de computadores disponíveis e depois fará a apresentação do simulador. Para tal etapa será utilizado o simulador PhET¹⁷ para que os alunos possam visualizar e assimilar melhor o gráfico do espectro da Radiação do Corpo Negro e também o simulador auxiliará a responder o questionário.

5. Aula integradora final: Retomar os principais conceitos trabalhados ao longo da UEPS buscando a reconciliação integrativa, para esse fim será proposto um vídeo e ao final solicitar a construção de um segundo Mapa Conceitual para que os alunos possam externalizar os conceitos e significados assimilados. O professor atuará colaborativamente na construção do mapa e com a negociação de significados.

¹⁷ Fundado em 2002 pelo Prêmio Nobel Carl Wieman, o projeto PhET Simulações Interativas da Universidade de Colorado Boulder cria simulações interativas gratuitas de matemática e ciências. As sims PhET baseiam-se em extensa pesquisa em educação e envolvem os alunos através de um ambiente intuitivo, estilo jogo, onde os alunos aprendem através da exploração e da descoberta.

6. Avaliação individual: Propor questões abertas nas quais os alunos possam expressar livremente sua compreensão do tema proposto.

7. Avaliação da aprendizagem: deve ser feita durante toda a aplicação da SD, verificando evidência de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado. Para isso o professor baseia-se nas atividades desenvolvidas pelos alunos e nas observações feitas em sala de aula.

8. Avaliação da UEPS: deverá ser feita em função dos resultados de aprendizagem obtidos. Reformular algumas atividades, se necessário.

4.4 Relato da aplicação da Sequência Didática

4.4.1 Situação inicial (2 aulas)

a) Aula 1 (50 min)

No primeiro encontro, foi explicado a proposta da Sequência Didática e em seguida foi proposto uma atividade que teve o objetivo de levantar os conhecimentos prévios dos alunos. Nessa ocasião, os alunos observaram as imagens mostradas nos slides e conseqüentemente surgiram algumas perguntas e tentativas de explicar o que representavam. Veja, no anexo A, a sequência de imagens utilizadas para que os alunos possam observar e interpretar fisicamente.

b) Aula 2 (50 min)

No segundo encontro, o professor retomou as imagens e fez algumas perguntas sobre o que eles observaram e quais conceitos físicos estavam relacionados com essas imagens. Foi pedido para eles anotarem nos seus cadernos o que representava cada imagem, posteriormente pediu que eles tentassem fazer conexão de uma imagem com a outra e em seguida foi distribuída uma folha de papel para cada aluno e identificado como Aluno A, Aluno B, Aluno C, etc. Dessa forma, eles puderam descrever as suas observações e externalizar os seus conhecimentos prévios de acordo com a sequência de imagens apresentadas.

4.4.2 Situação problema inicial (3 aulas)

a) Aula 1 (50 min)

Levando em consideração os conhecimentos prévios dos alunos, foi proposto um vídeo que se encontra disponível no endereço: <https://www.youtube.com/watch?v=YOVRHo1LFSU>. Quando o professor propôs à turma assistir ao vídeo, os alunos se mostraram motivados. Além do conteúdo de ensino, o vídeo traz a curiosidade e atratividade de sons, imagens, realidade próximas e distantes, imaginação e isso faz com que a aula se torne prazerosa para o aluno. Esse vídeo traz informações sobre o surgimento da Física Quântica, o desafio de encontrar a equação que descreve a curva característica do gráfico do espectro da Radiação do Corpo Negro, Max Planck e a idéia de quantização da energia. Após os alunos assistirem ao vídeo, foi entregue o texto (Anexo B) para eles lerem como forma de complementar e ajudar no entendimento dos conceitos apresentados no vídeo. O texto enfatiza de maneira simples e introdutória os conceitos da Radiação do Corpo Negro, o qual levou ao surgimento de uma nova física.



Figura 6 – Imagem da tela do vídeo utilizado na Situação problema inicial

b) Aula 2 (50 min)

Nesse encontro, iniciou-se com perguntas aos alunos referentes ao vídeo e ao texto e também, um pequeno debate sobre os conceitos apresentados. O professor pode lembrá-los de algumas passagens importantes do vídeo, por exemplo: a idéia da quantização mostrada no vídeo com a da quantização mostrada no texto para que eles pudessem entender este conceito de quantização e, também, uma breve introdução sobre a Radiação do Corpo Negro. Após esse debate, através de slides, foi apresentado à turma dois exemplos de Mapas Conceituais e ensinado como construir um Mapa Conceitual.

c) Aula 3 (50 min)

Nesse momento, foi proposto que os alunos confeccionassem o Mapa Conceitual sobre os conceitos e significados que eles adquiriram ao assistir o vídeo e ao ler o texto, conseqüentemente os alunos pediram para eu repetir o vídeo com a intenção de lembrar alguns conceitos. Logo após a repetição do vídeo, o professor pediu aos alunos para que formassem duplas, foi entregue uma folha de papel para cada dupla e que eles se identificassem com as mesmas letras da atividade feita na Situação inicial. Conforme alguns alunos relataram que haviam esquecido as suas respectivas letras de identificação, o professor pediu que os alunos se identificassem com os seus números da lista de presença do diário de classe.



Figura 7 – Os alunos construindo o Mapa Conceitual referente ao vídeo e ao texto da Situação problema inicial

4.4.3 Aprofundando conhecimento (2 aulas)

a) Aula 1 (50 min)

Através de slides, foi desenvolvido pelo professor uma aula expositiva, iniciou-se com uma contextualização histórica e depois enfatizou os conceitos que deram ênfase para o estudo da Radiação do Corpo Negro idealizado por Kirchoff e também apresentou aos alunos a lei de Stefan-Boltzmann e a lei de Wien.

b) Aula 2 (50 min)

O professor retomou com um resumo da aula anterior e aprofundando ainda mais nos conceitos do tema proposto. Nesse momento, foi trabalhado os conceitos da teoria clássica de Rayleigh-Jeans sobre a curva teórica do gráfico do espectro da Radiação do Corpo Negro e que para baixas frequências estava de acordo com os dados experimentais e para altas frequências não concordava. Essa diferença era conhecida como a catástrofe do ultravioleta e finalmente a grande idéia de Max Planck com a quantização da energia¹⁸. No final, tivemos um tempo onde os alunos puderam perguntar e debater sobre o assunto em si.

4.4.4 Situação problema de aprofundamento (2 aulas)

a) Aula (100 min)

Essa aula foi desenvolvida no laboratório de informática da escola com o uso do simulador PhET e um questionário. Inicialmente o professor pediu que os alunos formassem grupos de dois alunos e utilizassem um computador por grupo. Depois que eles se organizaram foi apresentado aos alunos o simulador e durante a sua apresentação o professor pôde fazer uma retomada dos conceitos estudados. Além disso, as atividades realizadas com uso do simulador ajudaram aos alunos visualizar e assimilar melhor o gráfico do espectro da Radiação do Corpo Negro. O simulador PhET se encontra disponível no endereço: https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt_BR.html.

¹⁸ Do ponto de vista epistemológico, quando Max Planck, em 1900, explicou a curva da radiância do Corpo Negro, tudo era confuso para ele, apenas se propôs a obter uma expressão matemática para simular os resultados experimentais. Rigorosamente falando, Planck não propôs inicialmente que a energia é quantizada, foi na hora do “desespero” que ele discretizou a energia (do oscilador? da onda?). Mas para fim didático, este aspecto não é relevante para o desenvolvimento desta intervenção.

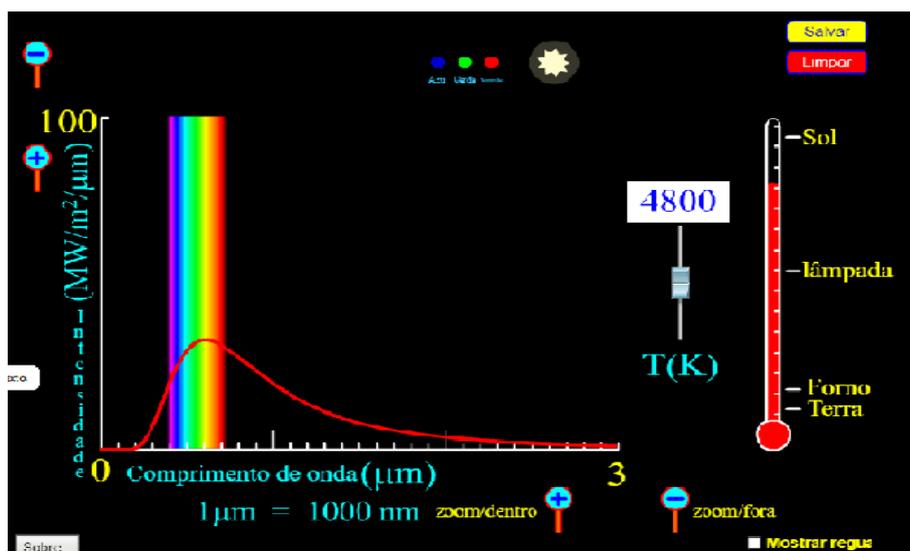


Figura 8 – Imagem da tela do simulador PhET

Após a explicação e a familiarização com o simulador, foi distribuído o questionário para cada grupo. Com o simulador e o questionário em mãos, os alunos iniciaram as tarefas utilizando o simulador como ferramenta para responder o seguinte questionário:

Questão 1 – Um corpo a uma temperatura de 600K emite luz? que tipo de radiação é emitida?

Questão 2 – A que temperatura um objeto que irradia como um Corpo Negro começa a emitir luz visível?

Questão 3 – Ao analisar a luz proveniente de uma estrela, um astrônomo percebe que o pico de intensidade ocorre em 630nm. Qual o valor aproximado para a temperatura superficial dessa estrela?

Questão 4 – Quando o corpo está a uma temperatura de 6600K, qual a cor da região visível que ele emite mais intensamente?

Questão 5 – De acordo com o aumento da temperatura, podemos observar um comportamento diferente no gráfico para cada temperatura? Explique.

Questão 6 – Aproveitando alguns pontos de marcação do termômetro apresentado no simulador e o gráfico do espectro da radiação, calcule a constante de Wien.



Figura 9 – Alunos no laboratório de informática aprofundando o conhecimento sobre a Radiação do Corpo Negro com o uso do simulador PhET

4.4.5 Aula integradora final (2 aulas)

a) Aula (100 min)

Nesse encontro, com o objetivo de retomar os principais conceitos ao longo da UEPS, o professor propôs um vídeo que se encontra disponível em: <https://www.casadasciencias.org/cc/redindex.php?idart=303&gid=38507363>. Esse vídeo aborda a problemática da Radiação do Corpo Negro, a catástrofe do ultravioleta e como esta levou Planck¹⁹ à formulação da teoria quântica da luz e também brevemente a aplicação da mecânica quântica ao efeito fotoelétrico e a dualidade onda-partícula da luz.

O vídeo ajudou aos alunos visualizarem novamente o gráfico do espectro da Radiação do Corpo Negro e reforçar o que eles já haviam feito no laboratório de informática e, também, na recapitulação dos conceitos vistos ao longo da UEPS. Após o vídeo, o professor fez alguns comentários relevantes e os alunos puderam ter melhor compreensão do assunto.

Para atividade final foi proposto a construção de um segundo Mapa Conceitual. A turma foi dividida em grupos de dois alunos e durante a atividade os alunos contaram com a colaboração do professor na reconciliação dos conceitos.

¹⁹ Rigorosamente falando, no desenvolvimento da teoria de Planck, em 1900, na realidade a formulação da equação para descrever os resultados experimentais da radiação do Corpo Negro não teve como motivação a catástrofe do ultravioleta, e sim no objetivo apenas de descrever os resultados experimentais que na época eram disponíveis.



Figura 10 – Imagem da tela do vídeo utilizado na Aula integradora final

4.4.6 Avaliação Individual (1 aula)

a) Aula (50 min)

Foi proposto três questões abertas sobre o conteúdo do tema proposto desenvolvido ao longo da UEPS. As questões foram as seguintes: O que é Física Quântica? Explique o que é um Corpo Negro? Explique o que é Quantização da energia.

Essa atividade objetivou avaliar individualmente os alunos considerando evidências de captação de significados e compreensão.

5 RESULTADOS

5.1 Atividade desenvolvida na (Situação inicial)

Nessa atividade inicial, o professor utilizou uma sequência de imagens as quais serviram para ativar os subsunçores da turma. A sequência de imagens retratava: imagem 1 – átomo, imagem 2 – partículas em movimento, imagem 3 – onda eletromagnética, imagem 4 – radiação térmica, imagem 5 – corpos em alta temperatura emitindo luz em diferentes cores e imagem 6 – espectro da luz visível. Foi pedido aos alunos que eles descrevessem os fenômenos e conceitos físicos que haviam observados e compreendidos na sequência de imagens.

Seguem algumas respostas selecionadas, reproduzidas integralmente e com sua grafia original:

Aluno C: 1. Átomo, 2. Agitação de partículas, 3. Ondas, 4. Ondas de calor, 5. Luz, 6. Absorção de calor; frequência das cores; lugares dos quais absorve mais calor.

Corpos superaquecidos em uma determinada temperatura, faz com que a mesma emitam luz.

Aluno O: *átomos e elétrons, um campo elétrico ao redor. *Ondas mostradas no eixo x e y. *Absorção de calor pela pele. *Absorção de calor pelo corpo humano.

Aluno D: o aquecimento das partículas (átomos) agita as mesmas, o calor pode ser sentido através do movimento de ondas que não podemos ver. Matérias extremamente aquecidas produzem luz como o sol. A luz do sol passando pelo prisma forma as cores (em diferentes frequências).

Aluno B: a agitação das partículas gera ondas de calor, e todo corpo que gera calor produz luz de diversas cores, e cada corpo tem seu nível de calor em partes específicas umas mais elevadas que outras.

Aluno N: são os núcleos e isso faz com que as moléculas fiquem em movimento e formam ondas e gera calor e também gera o aquecimento das coisas e a temperatura do corpo.

Aluno R: as imagens mostram uma sequência, primeiro os átomos, em seguida o movimento das moléculas, depois as ondas, em seguida as ondas de calor, por fim as estrelas que é o final.

Aluno F: os átomos, as ondulações, o calor, o frio, a luz, a energia, tudo tem ligação.

Aluno L: entendi que todas as imagens estão ligadas com a física, como os átomos e o ferro.

Aluno H: o átomo faz parte em tudo que existe em toda a nossa vida, no caso do universo os sentidos são equivalente para ajudarmos em nosso cotidiano. A física é de Deus e a cada dia vai evoluindo ! E trás para os indivíduos coisas que farão diferença para eles.

***Aluno E:** átomos se ligando com outras, um gráfico que parece um DNA espiral, uma mão de uma pessoa sentindo a temperatura de um ferro de passar, o sol no céu.*

Foi perceptível a atenção dos alunos ao ser mostrada a sequência de imagens, através de slides, a qual aguçou a mente dos alunos ao visualizarem e tentarem descobrir que fenômeno físico retratava cada imagem. Apesar de eles utilizarem lápis e folha de papel para descreverem as suas observações, como de costume nas aulas tradicionais, a aula nesses moldes foi atraente.

No início, eles apresentaram um pouco de dificuldade em descrever as suas observações, mas logo foi falado pelo professor para eles ficarem calmos e somente descreverem o que eles entendiam, pois essa era uma atividade de sondagem e quanto menos o professor interferisse nas respostas seria melhor para colher o resultado e preparar as próximas aulas. De certa forma, o professor ajudou fazendo algumas perguntas: “*O que tem haver a agitação de uma partícula com a onda eletromagnética? Será se a cor de um objeto aquecido tem algo a ver com a sua temperatura?*”.

Em geral, a maioria dos alunos conseguiu descrever que a agitação das partículas gera ondas, aquece os materiais e gera o calor²⁰, além disso, percebe-se que os alunos associam o conceito de radiação térmica com ondas de calor. Somente os **Alunos C, D e B** descreveram que os materiais aquecidos emitem luz e apenas o **Aluno B** descreve que os materiais aquecidos emitem luz de diferentes cores. É válido lembrar que nenhum aluno citou que a cor da luz emitida por materiais aquecidos é determinante para saber a sua temperatura. A atividade desenvolvida mostrou-se válida e alcançou o seu objetivo, que era levantar os conhecimentos prévios da turma.

5.2 Atividade desenvolvida na (Situação problema inicial)

Nessa etapa, buscou trabalhar os conceitos iniciais do tema proposto sem aprofundamento, para isso os alunos assistiram ao vídeo primeiramente e depois complementaram com a leitura do texto. Feito isso, os alunos formaram duplas e desenvolveram a construção dos Mapas Conceituais. No início, praticamente todos os alunos apresentaram dificuldades, visto que era o primeiro contato deles com Mapas

²⁰ Fisicamente falando, o calor não é gerado, mas isto é um jargão usado que leva à tona o velho conceito do calórico. Na realidade o calor é o mecanismo de transferência de energia térmica quando experimentamos um gradiente de temperatura ∇T .

Conceituais. A idéia era que eles não se preocupassem com a construção perfeita de um Mapa Conceitual, mas expor os conceitos corretamente dentro do contexto apresentado.

Como resultado dessa atividade, seguem abaixo os Mapas Conceituais construídos pelos alunos:

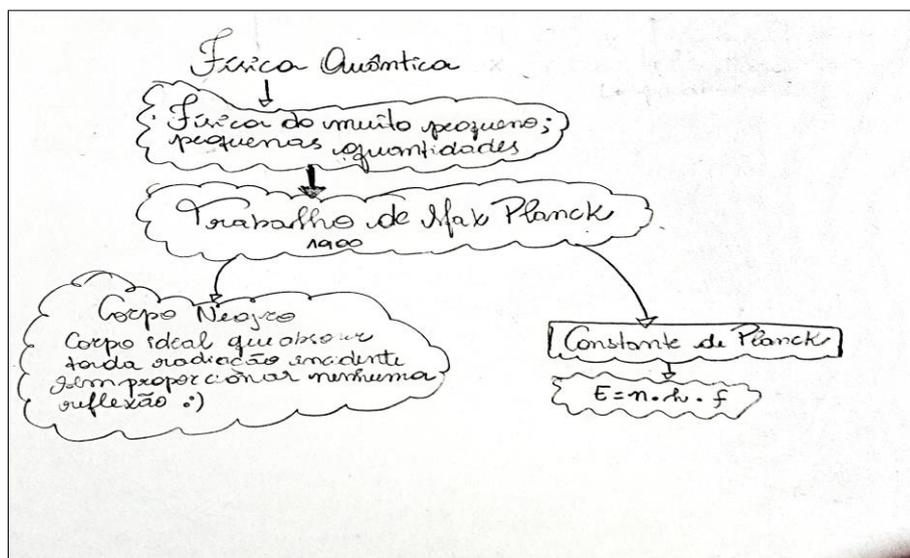


Figura 11 – Mapa Conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelos Alunos 29 e 34

Esse Mapa Conceitual construído pelos **Alunos 29 e 34** é iniciado com o conceito de “Física Quântica” explicando o que a Física Quântica estuda, liga o trabalho de Max Planck, idealizado em 1900, com a definição do conceito de Corpo Negro e também com a constante de Planck. Ficou evidente que esse grupo assimilou boa parte dos conceitos trabalhados nessa atividade proposta, apesar de deixar de explorar conceitos, por exemplo, emissão de luz por corpos aquecidos, quantização da energia e a confirmação da teoria de Planck com o efeito fotoelétrico proposto por Einstein²¹.

²¹ No desenvolvimento teórico da teoria quântica da luz por Einstein, em 1905, onde ele propôs que a energia da onda eletromagnética era composta de unidades pequenas que ele denominou de quantum (que mais tarde foi denominado de fóton), não se faz menção ao trabalho de Planck e sim a expressão teórica de Wien. Portanto, é muito comum nos livros didáticos esta forte analogia das ideias de Planck com a teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico.

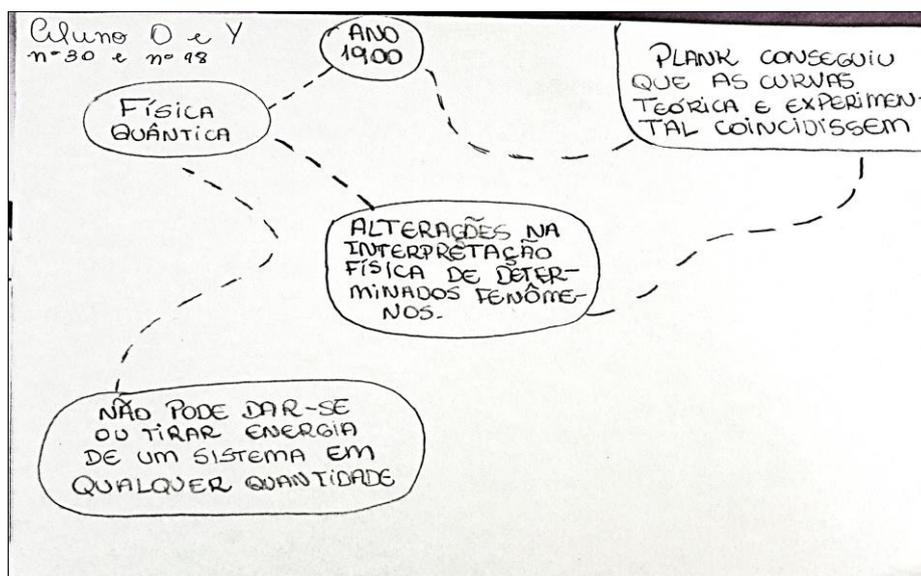


Figura 12 – Mapa Conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelos Alunos 30 e 18

Esse Mapa Conceitual construído pelos *Alunos 30 e 18* relata desde o ano do nascimento da Física Quântica, idealizado por Planck, ao conceito de quantização da energia “*Não pode dar-se ou tirar energia de um sistema em qualquer quantidade*” e na qual culminou na alteração da interpretação de fenômenos físicos e a solução de Planck no tratamento do gráfico da curva teórica e experimental. Já o conceito de Corpo Negro não é explorado, tampouco a confirmação da teoria quântica pelo efeito fotoelétrico. Em geral, o grupo conseguiu desempenhar a atividade proposta e mostrar que boa parte dos conceitos foram assimilados.

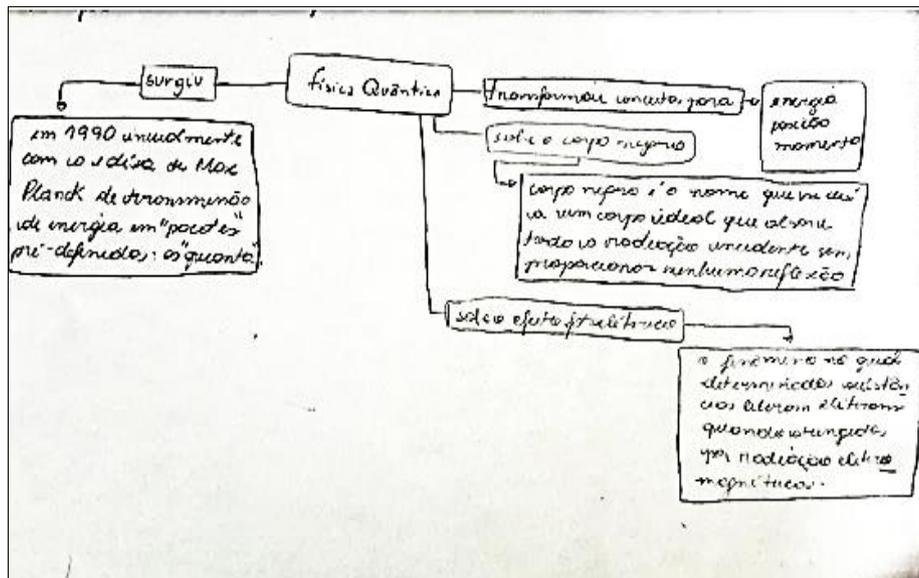


Figura 13 – Mapa Conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelos Alunos 21 e 12

Esse Mapa Conceitual construído pelos *Alunos 21 e 12* explica o surgimento da Física Quântica e o novo conceito de energia idealizado por Max Planck, o conceito de Corpo Negro, o fenômeno do efeito fotoelétrico que confirmava a teoria de Planck e há um quadro que chamou atenção onde tem as palavras “*energia, posição e momento*” na qual o vídeo e o texto de apoio não trazem a informação de que a Física Quântica trouxe um novo conceito de posição e momento. Acredita-se que o grupo possa ter utilizado o celular para fazer algumas pesquisas na internet, pois alguns alunos estavam com o celular em sala de aula. De modo geral, percebe-se que houve assimilação de boa parte dos conceitos apresentados.

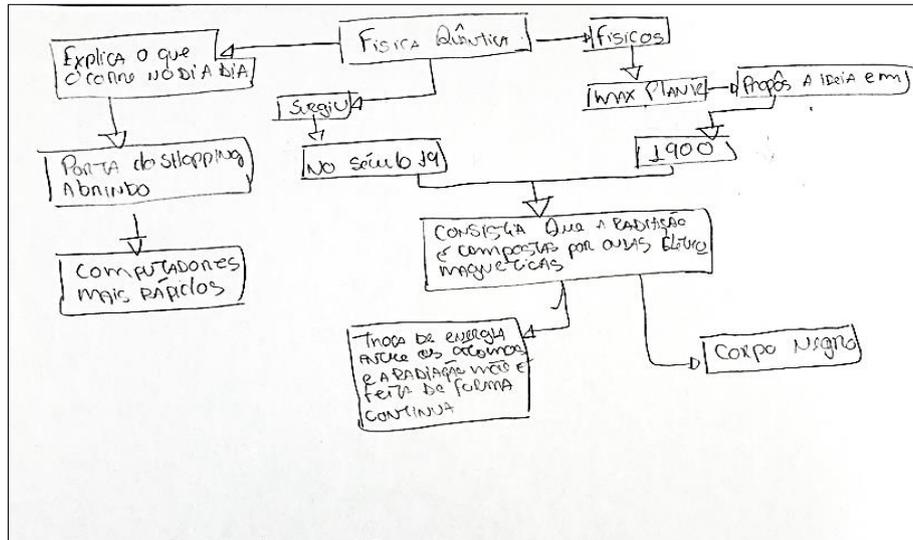


Figura 14 – Mapa Conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelo Aluno 39

Esse Mapa Conceitual desenvolvido pelo **Aluno 39** explica quando a Física Quântica surgiu, quem propôs a ideia, conceitua a troca de energia entre os átomos que se dá de forma não contínua, há um quadro “*Corpo Negro*” que liga com outro onde fala que a radiação é composta por ondas eletromagnéticas e também nesse Mapa Conceitual há um diferencial entre os outros no qual ele explica como a Física Quântica é usada no dia a dia “*porta do shopping abrindo e computadores mais rápidos*”. Faltou explorar alguns conceitos, por exemplo, a emissão de luz por corpos aquecidos, o próprio conceito de *Corpo Negro*, a teoria clássica que não conseguia explicar o que se media nos experimentos e o efeito fotoelétrico que confirmava a teoria quântica. Em geral, foi bastante proveitosa e serviu de aprendizado para a inserção desses primeiros conceitos e sem aprofundamento.

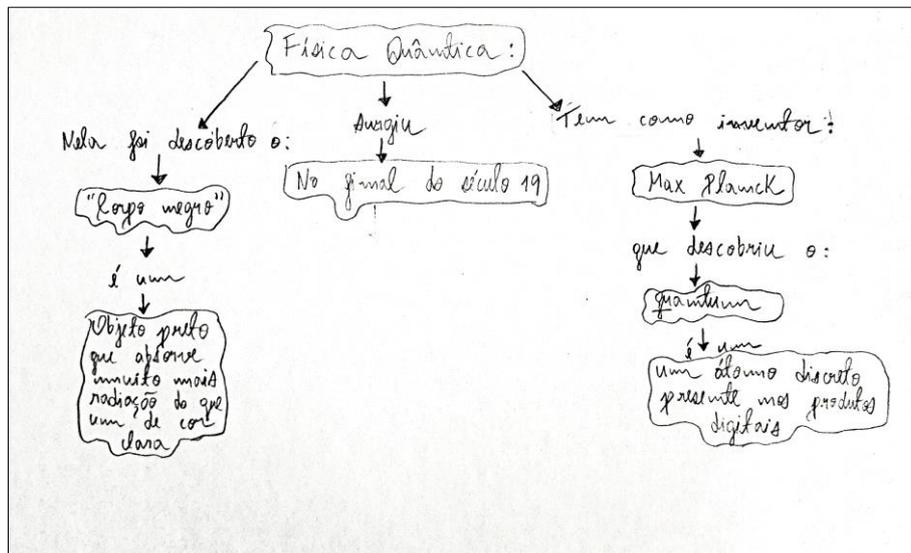


Figura 15 – Mapa Conceitual desenvolvido na Situação problema inicial pelos Alunos 31 e 13

Nesse Mapa Conceitual desenvolvido pelos *Alunos 31 e 13* é apresentado o conceito de Corpo Negro, o período do surgimento da Física Quântica, quem foi o seu inventor e que descobriu o “*quantum*”. Curiosamente percebe-se que houve a tentativa de conceituar e exemplificar o termo “*quantum*”²² como sendo “*um átomo discreto presente nos produtos digitais*”, na realidade é um termo que determina quantidade e com o surgimento da Física Quântica pôde-se desenvolver novas tecnologias e ser aplicada nos produtos digitais. Percebe-se pelo professor que o grupo deixou de explorar alguns conceitos e que poderia ter desenvolvido melhor a construção do Mapa Conceitual, contudo houve assimilação em parte dos conceitos apresentados.

²² Planck não propôs a ideia do quantum de energia, quem fez isto foi Einstein, em 1905, e aprofundado em 1916 com a teoria quântica da luz (“*precursor da construção do laser*”).

5.3 Atividade desenvolvida na (Situação problema de aprofundamento)

Essa atividade foi desenvolvida no laboratório de informática da escola com o uso do simulador PhET o qual serviu de aprofundamento do tema e também como ferramenta para responder o questionário. Veja abaixo as respostas do questionário aplicado, reproduzidas integralmente e com sua grafia original:

Questão 1 – Um corpo a uma temperatura de 600K emite luz? que tipo de radiação é emitida?

Alunos 12 e 26 : sim. Infravermelha

Alunos 18 e 30: não, radiação infra-verm

Aluno 29 e 34: não. Radiação infra-vermelha

Alunos 24 e 23: sim, infra-vermelho

Alunos 15 e 10: não. Infravermelho

Alunos 06 e 07: não emite luz, radiação infravermelha

Alunos 22 e 25: sim, radiação vermelha

Alunos 09 e 37: sim, infravermelha

Alunos 01, 03 e 33: sim, ultravioleta

Alunos 31, 13 e 08: não. Infravermelho

Alunos 02 e 03: sim. Radiação vermelha

Alunos 21 e 14: sim. Infravermelha

Nessa questão, utilizando-se do simulador, cada grupo ajustou a temperatura em 600K e percebeu-se que nessa temperatura ainda não havia emissão de luz visível. No total de 12 grupos, 7 erraram respondendo “sim” e 5 acertaram respondendo “não”. Na sequência, praticamente todos acertaram o tipo de radiação “infravermelha” que é emitida pelo corpo a uma temperatura de 600K, com exceção do grupo *Alunos 01, 03 e 33* que citou a “radiação ultravioleta” e dos grupos *Alunos 22 e 25* e *Alunos 02 e 03* que erraram na escrita informando “radiação vermelha”.

Questão 2 – A que temperatura um objeto que irradia como um Corpo Negro²³ começa a emitir luz visível?

Alunos 22 e 25: a partir de 885

Alunos 02 e 03: 750 T(K)

Alunos 31, 13 e 08: a 795K

Alunos 01, 03 e 33: 615

Alunos 09 e 37: a partir de 975K

Alunos 06 e 07: 1065K

Alunos 15 e 10: 750 T(K)

Alunos 24 e 23: T= 750K

Alunos 29 e 34: 750K

Alunos 18 e 30: por volta de 1400K

Alunos 12 e 26: 97K

Alunos 21 e 14: a partir de 930K

Considerando que o controle de ajuste de temperatura do simulador era um pouco sensível e também a luz emitida no visor da tela do simulador não era nítida, é válido como resposta a faixa de temperatura entre 750K e 1000K. No total de 12 grupos, 66 % acertaram e isso significa que 8 grupos apresentaram respostas dentro da faixa de temperatura aceita.

Questão 3 – Ao analisar a luz proveniente de uma estrela, um astrônomo percebe que o pico de intensidade ocorre em 630nm. Qual o valor aproximado para a temperatura superficial dessa estrela?

Alunos 12 e 26: 4575K

Alunos 21 e 14: 4575K

²³ O objeto tratado aqui se comporta como um Corpo Negro.

Alunos 22 e 25: 4410

Alunos 02 e 03: 4710 T(K)

Alunos 31, 13 e 08: 4710K

Alunos 01, 03 e 33: 5925

Alunos 09 e 37: 4575K

Alunos 06 e 07: 660K

Alunos 24 e 23: 470 T(K)

Alunos 29 e 34: 4710K

Alunos 15 e 10: 4710 T(K)

Alunos 18 e 30: aproximadamente 4575K

Utilizando uma régua disponível no simulador, os alunos puderam ajustá-la na posição de 630nm, de forma que ao intervir na temperatura o gráfico ia se ajustando até coincidir com o pico e aí cada grupo tinha a resposta da temperatura que havia ajustado. No total de 12 grupos, 9 responderam corretamente, levando em consideração para uma faixa de ajuste de temperatura entre 4350K a 4750K, isso significa 75% de acertos.

Questão 4 – Quando o corpo está a uma temperatura de 6600K, qual a cor da região visível que ele emite mais intensamente?

Alunos 12 e 26: Azul, próximo do violeta

Alunos 21 e 14: Azul

Alunos 22 e 25: A intensidade dele vai está em 316, e vai atingindo a cor escuro, puxando para o ponto violeta

Alunos 02 e 03: no 316 a cor atinge no azul escuro para violeta e roso

Alunos 31, 13 e 08: violeta

Alunos 01, 03 e 33: 316 atinge a cor azul escuro

Alunos 09 e 37: azul próximo do violeta

Alunos 06 e 07: azul

Alunos 24 e 23: 316 atinge a cor azul escuro em 6600

Alunos 29 e 34: violeta

Alunos 15 e 10: azul

Alunos 18 e 30: o azul

Nessa questão, os alunos ajustaram a temperatura em 6600k e perceberam no gráfico que o pico da intensidade de emissão de energia coincidia com a cor azul do espectro visível. No total de 12 grupos, 9 acertaram a resposta, ou seja, 75% acertaram.

Questão 5 – De acordo com o aumento da temperatura podemos observar um comportamento diferente no gráfico para cada temperatura. Explique.

Alunos 12 e 26: Pela intensidade de 316 MW/m²/Nm, com o aumento da temperatura em K, no pico se move e x desloca para a direita (o maior)

Alunos 21 e 14: Conforme a temperatura aumenta, o pico nave, ou seja, as cores mudam

Alunos 22 e 25: A cada aumento de temperatura a cor vai mudando até chegar a cor violeta e assim va

Alunos 02 e 03: Sim, pois a cada momento de que a temperatura aumenta o comportamento muda

Alunos 31, 13 e 08: O comprimento de onda diminui e a intensidade aumenta

Alunos 01, 03 e 33: Quando aumenta vai pra esquerda +
Quando diminui vai pra direita -

Alunos 09 e 37: Conforme a temperatura aumenta/diminui o pico muda de cor

Alunos 06 e 07: Sim, há uma variação no aumento de temperatura que modifica o gráfico

Alunos 24 e 23: sim, por que a cada temperatura muda as cores

Alunos 29 e 34: O pico se desloca para a esquerda ficando menor

Alunos 15 e 10: Conforme o aumento da temperatura, aumenta o pico e a altura a cor

Alunos 18 e 30: Com o aumento da temperatura o pico da onda se desloca para a esquerda, diminuindo o comprimento de onda.

Essa questão tinha o objetivo de os alunos observarem através do simulador que ao aumentar a temperatura o pico da intensidade de emissão de energia se deslocava para comprimentos de ondas menores, ou seja, de acordo com a lei do deslocamento de Wien. Alguns grupos atentaram somente para a mudança de cor quando aumentava-se a temperatura, por exemplo **Alunos 21 e 14**, **Alunos 22 e 25**, **Alunos 09 e 37** e **Alunos 24 e 23**. De acordo com o objetivo da questão, somente o grupo **Alunos 18 e 30** conseguiu uma resposta totalmente correta e os grupos **Alunos 29 e 34**, **Alunos 01, 03 e 33** e **Alunos 31, 13 e 08** conseguiram uma resposta parcialmente correta.

Questão 6 – Aproveitando alguns pontos de marcação do termômetro apresentado no simulador e o gráfico do espectro da radiação, calcule a constante de Wien.

Alunos 12 e 26: $745,500 \text{ K/m}^2$

Alunos 21 e 14: $700 \times 10^{-9} \times 1065 = c$

Alunos 22 e 25: $21.7 \times 10^{-6} = c$

Alunos 02 e 03: $2,7 \times 10^{-6} = c$

Alunos 31, 13 e 08: $57000 = c$

Alunos 01, 03 e 33: $c = 3.085.500$

Alunos 09 e 37: $7,455 \times 10^{-7}$

Alunos 06 e 07: sem resposta

Alunos 24 e 23: $c = 2.069.100 \times 10^{-9} \text{ m}$

Alunos 29 e 34: $57000 = c$

Alunos 15 e 10: $2,6 \times 10^{-6} = c$

Alunos 18 e 30: $29,04 \cdot 10^{-4} \text{ m.K}$

Nessa atividade, aproveitando os dados do termômetro e do gráfico no simulador, os alunos tinham que centralizar a régua em um valor fixo do comprimento de onda do espectro visível e depois ajustava a temperatura para que o pico da intensidade de emissão

de energia coincidissem com a régua. Feito isso, os alunos conseguiam os valores do comprimento de onda em nanometro e da temperatura em Kelvin, em seguida multiplicando o valor do comprimento de onda com a temperatura chegava-se ao valor da constante de Wien. Percebeu-se a grande dificuldade por parte dos alunos no tratamento dos dados, nas unidades de medidas e a deficiência no cálculo matemático. Apenas o grupo *Alunos 18 e 30* conseguiu chegar ao resultado e o grupo *Alunos 24 e 23* aproximou-se parcialmente do resultado.

5.4 Atividade desenvolvida na (Aula integradora final)

Após os alunos assistirem ao vídeo e recapitularem os conceitos estudados ao longo da UEPS, foi proposta a construção de um segundo Mapa Conceitual. Veja a atividade desenvolvida pelos alunos:

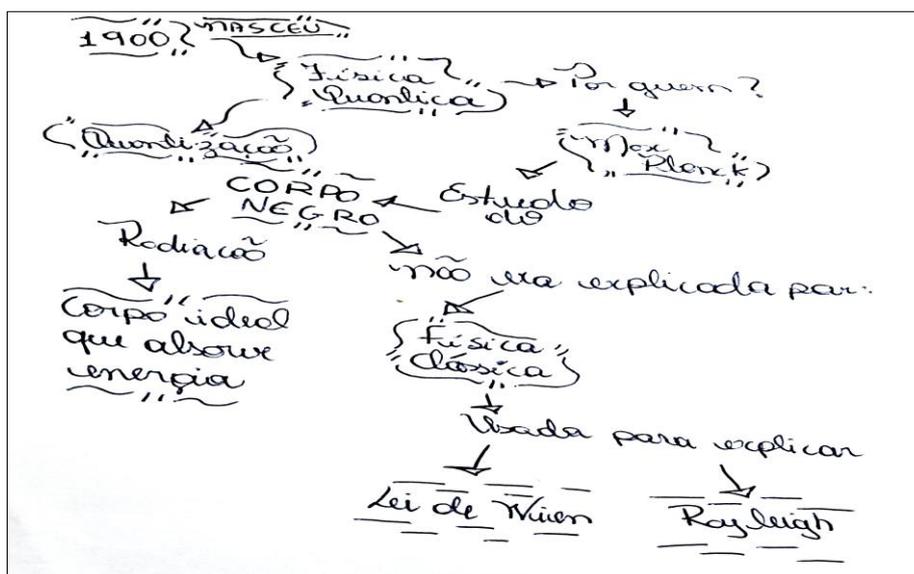


Figura 16 – Mapa Conceitual desenvolvido na Aula integradora final pelos Alunos 17 e 24

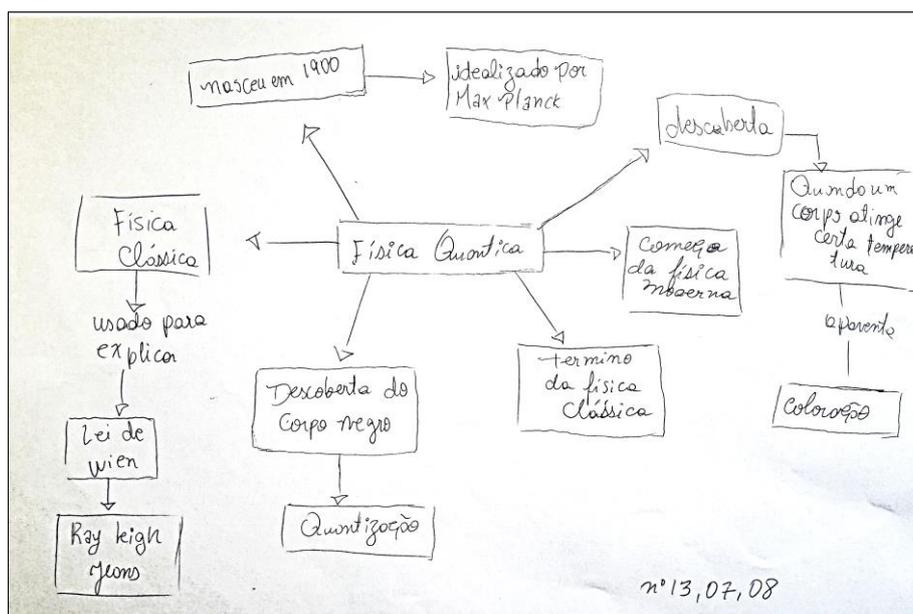


Figura 17 – Mapa Conceitual desenvolvido na Aula integradora final pelos Alunos 13, 07 e 08

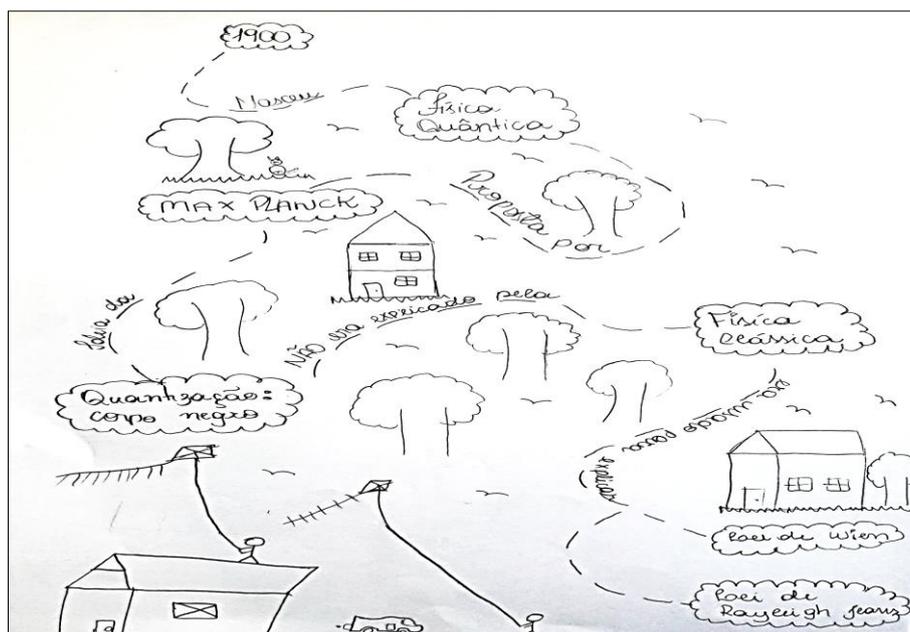


Figura 18 – Mapa Conceitual desenvolvido na Aula integradora final pelos Alunos 29 e 30



Figura 19 – Mapa Conceitual desenvolvido na Aula integradora final pelos Alunos 18 e 34

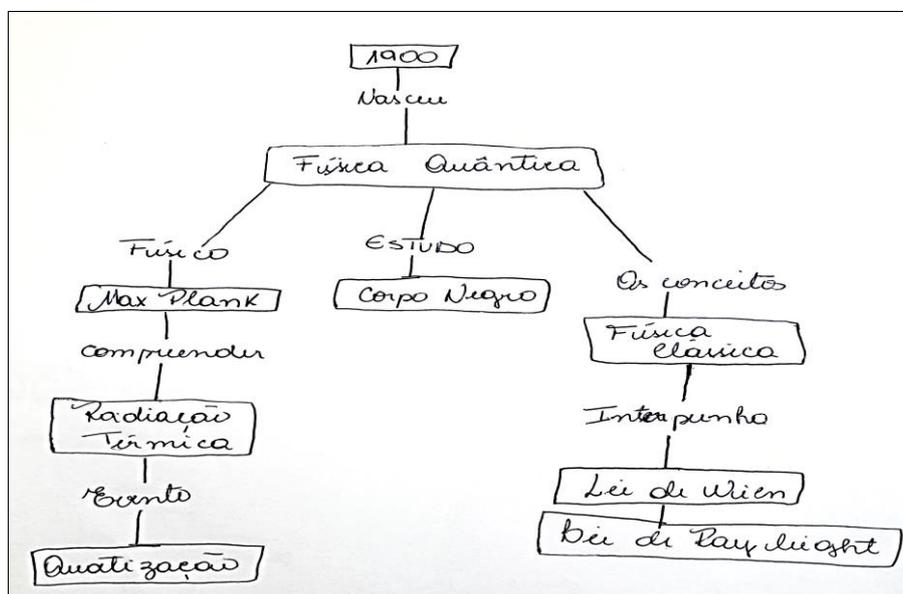


Figura 20 – Mapa Conceitual desenvolvido na Aula integradora final pelos Alunos 25 e 22

Feito uma análise dos Mapas Conceituais, nota-se a melhora na construção dos mapas, apesar de que a idéia principal dessa atividade é fazer com que os alunos externalizem os conceitos e significados estudados ao longo da SD. Percebe-se que todos os mapas trouxeram conceitos trabalhados na atividade desenvolvida na Situação problema inicial por exemplo, o relato do nascimento da Física Quântica no ano de 1900, a sua descoberta pelo físico Max Planck ao fazer estudos sobre a Radiação do Corpo Negro e a ideia de quantização da energia. A novidade nesses resultados é o surgimento de novos conceitos nos mapas desenvolvidos por exemplo: o papel da física clássica na tentativa de explicar o gráfico do espectro da Radiação do Corpo Negro através da lei de Wien e da lei de Rayleigh-Jeans. Além disso o grupo *Alunos 13, 07 e 08* foi o único a abordar a explicação da coloração do corpo quando atinge certa temperatura. De modo geral, os alunos mostraram que mais conceitos fazem parte da sua estrutura cognitiva.

5.5 Atividade desenvolvida na (Avaliação individual)

Nessa atividade, os alunos responderam individualmente ao questionário aberto composto por três questões. Veja abaixo algumas respostas selecionadas, reproduzidas integralmente e com sua grafia original:

Questão 1- O que é Física Quântica?

Aluno 29: Estudo dos átomos, das coisas que não se podem ver;

Aluno 34: Estudo do que não podemos ver, os átomos;

Aluno 06: É a tentativa de explorar fenomenos da natureza em pequenas partículas;

Aluno 25: Fornece descrições como a radiação de corpo negro, apesa dos casos ser relevante para descrever sistemas microscópicos;

Aluno 22: É a teoria que detém sucesso no estudo dos sistemas físicos cujas dimensões são próprias ou abaixo da escala atômica, tais como moléculas, átomos, elétrons, prótons e de outra partículas;

Aluno 17: Estudo dos Atomos.

De acordo com os dados das respostas, a maioria dos alunos responderam que a Física Quântica é o estudo das coisas que não podem ser vistas, ou seja, as partículas, os átomos. O **Aluno 25** citou como exemplo a Radiação do Corpo Negro e o **Aluno 22** copiou a sua resposta do site disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Mecânica_quântica.

Questão 2 - Explique o que é um Corpo Negro?

Aluno 17: *Corpo ideal que absorve calor;*

Aluno 29: *Corpo ideal que absorve toda radiação;*

Aluno 22: *É um objeto hipotético que absorve toda a radiação eletromagnética que nele existe: nenhuma luz o atravessa e nem é refletida;*

Aluno 13: *A idealização de um corpo perfeito que absorveria toda a radiação eletromagnética que incide nenhuma luz atravessa e nem reflete;*

Aluno 25: *Emitida por um corpo em qualquer temperatura constituindo uma forma de transmissão de calor, ocorre transferência de energia térmica na forma de ondas eletromagnéticas;*

Aluno 30: *É um corpo que absorve radiação, corpo ideal.*

A maioria conseguiu responder que o Corpo Negro é um corpo considerado como ideal, ou seja, perfeito e que absorve toda a radiação que incide sobre ele. O **Aluno 22** copiou a sua resposta do site disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Corpo_negro, diferentemente das outras respostas o **Aluno 25** não conseguiu uma resposta satisfatória à pergunta feita.

Questão 3 – Explique o que é Quantização?

Aluno 17: *Divisão elementar de um corpo;*

Aluno 06: *Energia que surge na tentativa de Max Planck, explicar a radiação emitida por um corpo negro;*

Aluno 34: *A menor parte de um tudo, dividir em partes elementares;*

Aluno 22: *É o processo de atribuição de valores discretos para um sinal cuja amplitude varia entre infinitos valores;*

Aluno 18: *É a divisão de partes elementares;*

Aluno 07: *Energia que surge na tentativa de Max Planck, explicar radiação emitida por um corpo negro.*

Nessa questão, foi perceptível que alguns alunos tentaram responder com suas próprias palavras por exemplo o **Aluno 18** respondeu “*É a divisão de partes elementares*” e o **Aluno 34** e **Aluno 17** também comentaram que é uma divisão elementar. De fato, o professor tentou lembrá-los falando do primeiro vídeo e do texto complementar que de maneira simples foi colocado como exemplo onde eles visualizaram a água caindo de forma contínua e depois as gotículas de forma discreta e o comentário do texto que eles leram e que falava que os “átomos trocam energia como os homens trocam dinheiro, em múltiplos de um centavo”. Outros conseguiram retirar comentários de sites da internet por exemplo o **Aluno 06** e **Aluno 07** retiraram do site disponível em: [https://lief.if.ufrgs.br/pub/cref/n25 Alvarenga/quantizacao.htm](https://lief.if.ufrgs.br/pub/cref/n25_Alvarenga/quantizacao.htm)²⁴ e o **Aluno 22** retirou do site disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Quantização>.

Durante a atividade, já nos finais, foi observado que alguns alunos dispunham de celular em sala de aula, mas o professor não atentou que alguns estavam pesquisando as respostas em sites da internet. O celular é uma ótima ferramenta aliada ao ensino, porém não é o fato de os alunos estarem pesquisando a resposta e sim de copiar literalmente a resposta da internet, a qual deveria ser traduzida pelos alunos com suas próprias palavras. No geral, a atividade foi satisfatória pelo motivo de não ser somente avaliativa, mas a estratégia de poder observar o resultado da aprendizagem e poder melhorar o ensino do tema proposto.

²⁴ Esta definição está errada, pois discretização da energia não significa em quantização. Por exemplo, uma corda no estado estacionário tem energia discretizada, mas não é um objeto quântico. Quantização tem a ver com a discretização de objetos quânticos.

5.6 Avaliação da aprendizagem

A avaliação ocorreu durante toda a aplicação da Sequência Didática. No início, os alunos foram submetidos a uma tarefa que visava levantar os conhecimentos prévios da turma e no geral apresentou conhecimento razoável. Na análise dos Mapas Conceituais construídos na (Situação problema inicial), a turma demonstrou ter captado alguns conceitos sobre o tema proposto apresentados pelo professor através do vídeo e da leitura complementar do texto. As repostas dos alunos ao questionário feito no laboratório de informática utilizando o simulador mostraram evolução da aprendizagem conforme o tema proposto era abordado progressivamente. No segundo Mapa Conceitual construído pelos alunos na (Aula integradora final), os alunos apresentaram grande melhoria em relação ao primeiro Mapa Conceitual com uma abordagem maior de conceitos e significados apresentados. Na (Avaliação individual) devido a extração de comentários copiados de sites de internet por boa parte dos alunos, não avaliei de forma positiva a aprendizagem da turma. No geral, os alunos mostraram evolução e evidência de aprendizagem significativa.

5.7 Avaliação da UEPS

Considerando os resultados obtidos nas atividades desenvolvidas e as observações feitas pelo professor. A UEPS obteve êxito devido aos alunos alcançarem a devida aprendizagem do tema proposto e é válido lembrar que um grande fator aliado para essa aprendizagem é que a Sequência Didática construída, conforme os passos da UEPS, possui essa característica de ser implementada de forma progressiva. Além disso, é que as aulas de certa forma trouxeram algo de diferente daquela aula tradicional por exemplo: o uso do simulador, os vídeos e a sequência de imagens.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Trabalhar a FMC nas escolas ainda é algo secundário, pois há uma ênfase maior na parte da Física Clássica. As pesquisas mostram que é essencial a introdução da FMC no ensino básico e não há dúvida de que a FMC detém os conceitos para a interpretação de grande parte das notícias científicas e da tecnologia atual.

De fato, quando o aluno realmente não quer aprender é sempre notório por parte do professor, mas muitas das vezes o real motivo está no desenvolvimento das aulas pelo professor que sequer sabe o que o aluno já traz de conhecimento prévio e outros motivos é que o professor não traz para sala de aula a tecnologia aliada ao ensino, a conexão com o dia a dia do aluno, temas atuais que levem a curiosidade do aluno.

Portanto, um material bem planejado, como é o caso desta SD, traz inúmeras vantagens para o aprendizado do aluno. Pode-se dizer que uma das principais vantagens é levar em consideração o conhecimento prévio do aluno. Citamos também como vantagem: os passos da UEPS serem introduzidas em nível crescente de complexidade, as situações-problemas desenvolvidas com uso de simuladores, vídeos, os mapas conceituais construídos pelos alunos e a avaliação que é feita ao longo de sua implementação e não somente em uma única avaliação.

A SD teve algumas falhas durante sua implementação que foram observadas como é o caso dos Mapas Conceituais construídos pelos alunos, os quais o professor fez somente alguns comentários juntamente com os alunos, não dando oportunidade para que os próprios alunos fizessem uma apresentação de seus mapas construídos, visto que o Mapa Conceitual reflete a organização mental de determinado assunto do sujeito que elaborou o mapa.

Diante dos resultados apresentados, no geral considero exitosa, pois os alunos aprenderam significativamente o conteúdo, considero como alcançado os objetivos. A teoria da Aprendizagem Significativa deu o suporte necessário e o material produzido é classificado como potencialmente significativo por atender os requisitos de uma UEPS.

O resultado deste trabalho culminou na produção do Produto Educacional com intuito de colaborar na produção de materiais que possam auxiliar o professor em sala de aula. Além disso, o material buscou ser acessível ao tempo do professor em sala de aula, não sendo extenso para que o professor possa trabalhar normalmente com o planejamento da escola. Portanto, o professor que utilizar este material pode fazer modificações para melhorar o material e adaptações de acordo com sua aula.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Guia de livros didáticos: PNLD 2015: Física: Ensino Médio**. Brasília: Ministério da Educação, 2014.

_____. MEC. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **PCNs+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília, 2002.

_____. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM): Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília: MEC/SEB, 2000.

DOMINGUINI, L. Física moderna no Ensino Médio: com a palavra os autores dos livros didáticos do PNLEM. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p. 2502, 2012.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em Educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: EPU, 1986.

MACHADO, M. **Elaboração e Desenvolvimento de uma Unidade Didática sobre os Conceitos de Transmissão de Calor e Radiação do Corpo Negro**. 2016. 234 p. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Polo de Lavras – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

MAXIMIANO, J. R.; CARDOSO, L.; DOMINGUINI, L. FÍSICA MODERNA NOS LIVROS DIDÁTICOS: UM CONTRAPONTO ENTRE O PNLEM 2009 E O PNLD 2012. **Revista eletrônica VIDYA**, v. 33, n. 1, p.97-115, jan./jun., 2013 - Santa Maria, 2013.

Disponível em: <<https://www.periodicos.unifra.br/index.php/VIDYA/article/view/248>>. Acesso em: 29 de mai. 2018.

MEGGIOLARO, G. P.; BETZ, M. E. M. **O Ensino da Radiação do Corpo Negro em Sala de Aula**, Seminário de Pesquisa em Educação da Região Sul - IX ANPED SUL, 2012.

Disponível em: <<http://www.uces.br/etc/conferencias/index.php/anpedsul/9anpedsul/paper/viewFile/591/894>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

MORAIS, B. H. F. et al. Proposta de ensino qualitativa para o conteúdo radiação de corpo negro no ensino médio. **In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS - CONAPESC**, 1., 2016, Campina Grande, Anais...Campina Grande: CONAPESC, 2016.

Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/revistas/conapesc/trabalhos/TRABALHO_EV058_MD4_SA90_ID2243_17052016220645.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2018.

MOREIRA, M. A. **O Que é afinal Aprendizagem Significativa?** Aula Inaugural do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais, Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá-MT, 23 de abril de 2010. Aceito para publicação, *Curriculum, La Laguna, Espanha*, 2012.

_____, M. A. **Mapas conceituais e aprendizagem significativa**. Adaptado e atualizado, em 1997, de um trabalho com o mesmo título publicado em O ENSINO, Revista Galáico Portuguesa de Sócio-Pedagogia e Sócio-Linguística, Pontevedra/Galícia/Espanha e Braga/Portugal, N° 23 a 28: 87-95, 1988. Publicado também em Cadernos do Aplicação, 11(2): 143-156, 1998. Revisado e publicado em espanhol, em 2005, na Revista Chilena de Educação Científica, 4(2): 38-44. Revisado novamente em 2012.

_____, M. A. **Subsídios teóricos para o professor pesquisador em ensino de ciências: A Teoria da Aprendizagem Significativa**. Porto Alegre-RS, 2009a.

_____, M. A. Organizadores prévios e aprendizagem significativa. **Revista Chilena de Educación Científica**, v. 7, n. 2, p. 23-30, 2008.

_____, M. A. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011.

_____, M. A. Aprendizagem significativa em mapas conceituais. **Textos de apoio ao professor de Física**, v. 24, n. 6, 2013.

MUSIAU, P. M. **Elaboração de uma sequência didática sobre conceitos de física moderna e contemporânea num dvd**. 2015. 183 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Polo do Campus de Ji-Paraná – Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná, 2015.

NOVAK, J. D.; CAÑAS, A. **A teoria subjacente aos mapas conceituais e como elaborá-los e usá-lo**. Práxis Educativa, Ponta Grossa, v. 5, p. 9-29, 2010.

OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447-454, 2007.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. **É Possível Levar a Física Quântica para Ensino Médio? Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, p. 7-34, 1999.

RODRIGUES, E. S.; BEZERRA, D. O.; SOUZA, C. J. M. Análise das propostas de inserção de física moderna e contemporânea e sua viabilidade de aplicação no ensino médio do Sertão Central Pernambucano. **C&D-Revista Eletrônica da FAINOR**, Vitória da Conquista, v.11, n.1, p. 144-173, jan/abr. 2018.

SILVA, S. M. **Uma experiência de inserção de astronomia e física moderna no ensino médio a partir do sol**. 2015. 222 f. Dissertação (Mestrado Profissional) – Centro de Ciências Exatas e da Terra – Universidade federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

APÊNDICE A

PRODUTO EDUCACIONAL

PROPOSTA DE INSERÇÃO DOS CONCEITOS DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO NO ENSINO MÉDIO ATRAVÉS DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA BASEADA EM UMA UEPS

Alderico dos Santos Sousa Filho

Apresentação: Esta é uma Sequência didática desenvolvida seguindo os passos de uma UEPS com aplicação no 3º ano do ensino Médio. A aplicação deste material foi possível realizar com 12 aulas de 50 minutos cada, mas o professor que utilizar este material poderá fazer modificações e adaptá-lo de acordo com sua aula.

Objetivo: O objetivo é propor uma Sequência Didática que visa a Aprendizagem Significativa, por meio de uma UEPS, que tem como objeto de estudo os conceitos da Radiação do Corpo Negro.

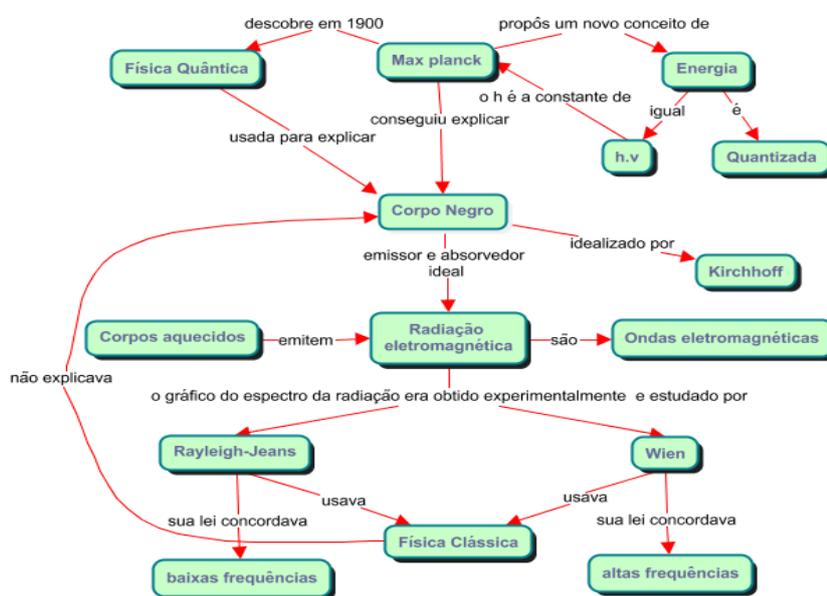
1. Situação inicial: explicar a proposta da Sequência Didática e em seguida propor uma atividade que tem o objetivo de levantar os conhecimentos prévios dos alunos. Nessa etapa, os alunos observarão as imagens (Anexo A) que serão mostradas através de slides e depois pedir para anotarem em uma folha de papel o que representa cada imagem observada e quais conceitos físicos estão relacionados com as imagens. Essa atividade inicial será feita individualmente e ao final deverá ser entregue ao professor.

2. Situação problema inicial: levando em consideração os conhecimentos prévios dos alunos, propor um vídeo que se encontra disponível no endereço: <https://www.youtube.com/watch?v=YOVRHo1LFSU>. O vídeo traz informações sobre o surgimento da Física Quântica, o desafio de encontrar a equação que descreve a curva característica da Radiação do Corpo Negro, Max Planck e a ideia de quantização da energia. Após os alunos assistirem ao vídeo, entregar o texto (Anexo B) para eles lerem como forma de complementar e ajudar no entendimento dos conceitos apresentados no

vídeo. O texto enfatiza de maneira simples e introdutória os conceitos da Radiação do Corpo Negro, o qual levou ao surgimento de uma nova física.

O próximo passo será iniciar com perguntas aos alunos referentes ao vídeo e ao texto e abrir espaço para um pequeno debate sobre os conceitos apresentados. O professor pode relembrá-los de algumas passagens importantes do vídeo, por exemplo, a ideia da quantização mostrada no vídeo com a ideia da quantização mostrada no texto para que eles possam entender o conceito da quantização e também já fazendo uma breve introdução sobre a Radiação do Corpo Negro. Após esse debate, através de slides, o professor apresentará à turma exemplo de Mapa Conceitual e ensinará como confeccioná-lo. Feito isso, pedir aos alunos que confeccionem um Mapa Conceitual sobre os conceitos e significados que eles adquiriram ao assistir o vídeo e ao ler o texto. Para isso o professor pedirá aos alunos para formarem grupos de dois ou três alunos e depois pedir que eles façam explicação sobre os Mapas Conceituais construídos para o grande grupo.

Veja um exemplo de Mapa Conceitual construído com o uso do software IHMC CmapTools. O software pode ser baixado gratuitamente através do endereço: <https://cmap.ihmc.us/>.



3. Aprofundando conhecimento: apresentar os conceitos da Radiação Térmica, explicando o que significa um Corpo Negro, lei do deslocamento de Wien, lei de Planck, a lei de Stefan e lei de Rayleigh-Jeans. Será abordado, também, o gráfico do espectro da radiação onde discutiremos os fenômenos da Física Clássica e da Física Quântica. Esses

conteúdos serão apresentados através de textos e também em slides, sendo estimuladas discussões no grande grupo.

4. Situação problema de aprofundamento: propor atividade no laboratório de informática utilizando-se do recurso computacional e um questionário de apoio. No início, o professor organizará a turma em grupos de alunos dependendo da quantidade de computadores disponíveis, depois fará a apresentação do simulador e durante a sua apresentação, concomitantemente o professor pode ir fazendo uma retomada dos conceitos estudados. Para tal será utilizado o simulador PhET, que se encontra disponível no endereço: https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt_BR.html, para que os alunos possam visualizar e assimilar melhor o gráfico do espectro da Radiação do Corpo Negro e além disso o simulador auxiliará os alunos a responderem o questionário.

Após a explicação e a familiarização com o simulador, será distribuído o questionário para cada grupo. Com o simulador e o questionário em mãos, os alunos iniciarão as atividades utilizando o simulador como ferramenta para responder o questionário.

Questão 1 – Um corpo a uma temperatura de 600K emite luz? que tipo de radiação é emitida?

Questão 2 – A que temperatura um objeto que irradia como um Corpo Negro começa a emitir luz visível?

Questão 3 – Ao analisar a luz proveniente de uma estrela, um astrônomo percebe que o pico de intensidade ocorre em 630nm. Qual o valor aproximado para a temperatura superficial dessa estrela?

Questão 4 – Quando o corpo está a uma temperatura de 6600K, qual a cor da região visível que ele emite mais intensamente?

Questão 5 – De acordo com o aumento da temperatura podemos observar um comportamento diferente no gráfico para cada temperatura. Explique.

Questão 6 – Aproveitando alguns pontos de marcação do termômetro apresentado no simulador e o gráfico do espectro da radiação. Calcule a constante de Wien.

5. Aula integradora final: com o objetivo de retomar os principais conceitos ao longo da UEPS, o professor irá propor um vídeo que se encontra disponível em: <https://www.casadasciencias.org/cc/redindex.php?idart=303&gid=38507363>. Esse vídeo aborda a problemática da Radiação do Corpo Negro, a catástrofe do ultravioleta e como esta levou Planck à formulação da teoria quântica da luz e também brevemente a aplicação da mecânica quântica ao efeito fotoelétrico e a dualidade onda-partícula da luz.

O vídeo ajudará aos alunos visualizarem novamente o gráfico do espectro da radiação e reforçará o que eles já haviam feito no laboratório de informática e também na recapitulação dos conceitos vistos ao longo da UEPS. Após o vídeo, o professor fará alguns comentários relevantes para que os alunos possam ter melhor compreensão do assunto e para atividade final propor a construção de um segundo Mapa Conceitual. Para isso a turma será dividida em grupos de dois ou três alunos e durante a atividade o professor pode ir colaborando na construção dos mapas para fazer a reconciliação dos conceitos.

6. Avaliação individual: propor questões abertas sobre o conteúdo do tema proposto desenvolvido ao longo da UEPS. Essa atividade objetiva avaliar individualmente os alunos, considerando evidências da captação de significados e compreensão. As questões poderão ser as seguintes: o que é Física Quântica? explique o que é um Corpo Negro? explique o que é Quantização da energia?

7. Avaliação da aprendizagem: a avaliação deve ser feita durante toda a aplicação da Sequência Didática, verificando evidência de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado. Para isso o professor baseia-se nas atividades desenvolvidas pelos alunos e nas observações feitas em sala de aula.

8. Avaliação da UEPS: a UEPS será considerada exitosa se os resultados de aprendizagem obtidos pelos alunos forem positivos. Reformular algumas atividades, se necessário.

Referências

MOREIRA, M. A. **O Que é afinal Aprendizagem Significativa?** Aula Inaugural do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais, Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá-MT, 23 de abril de 2010. Aceito para publicação, *Curriculum, La Laguna, Espanha*, 2012.

_____, M. A. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011.

_____, M. A. **Mapas conceituais e aprendizagem significativa**. Adaptado e atualizado, em 1997, de um trabalho com o mesmo título publicado em *O ENSINO, Revista Galáico Portuguesa de Sócio-Pedagogia e Sócio-Linguística*, Pontevedra/Galícia/Espanha e Braga/Portugal, N° 23 a 28: 87-95, 1988. Publicado também em *Cadernos do Aplicação*, 11(2): 143-156, 1998. Revisado e publicado em espanhol, em 2005, na *Revista Chilena de Educação Científica*, 4(2): 38-44. Revisado novamente em 2012.

ANEXO A

SEQUÊNCIA DE IMAGENS DA SITUAÇÃO INICIAL

Sequência de Imagens utilizadas na Situação inicial

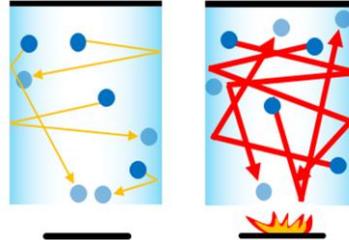
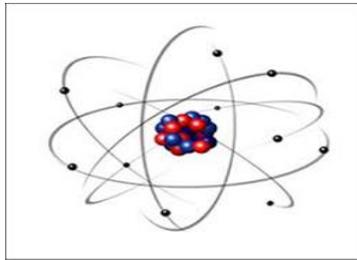


Imagem 1

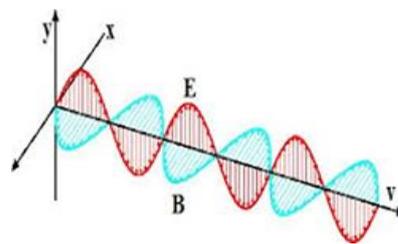


Imagem 2

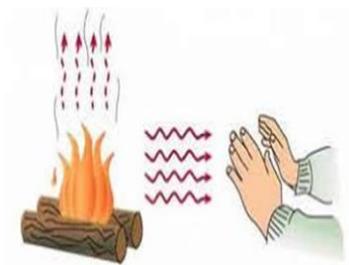


Imagem 3



Imagem 4

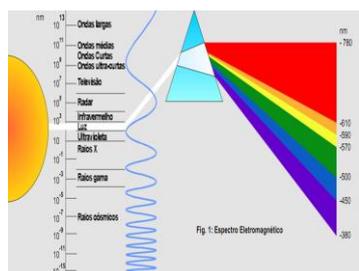


Imagem 5

ANEXO B

TEXTO CIENTÍFICO DA SITUAÇÃO PROBLEMA 1

Fonte: <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/mais/fs1712200003.htm>

A física que mudou o mundo

Luana Fischer/Folha Imagem



O alemão Max Planck (1858-1947), que propôs em dezembro de 1900 a idéia revolucionária da transmissão de energia em "pacotes" pré-definidos: os "quanta"

Os últimos cem anos mudaram a face da vida prática, como resultado da ideia de "quantum" o discreto charme do átomo, imaginado pelo físico alemão Max Planck em 1900. Qualquer produto digital recorre a essa realidade estranha e descontínua da escala atômica, do laser aos chips onipresentes. A física quântica tornou-se a alma oculta do mundo presente e o futuro será mais quântico do que nunca

*Marcelo Gleiser
especial para a Folha*

A transição do mundo clássico ao mundo quântico foi muito sofrida. Imagine a frustração dos físicos no final do século 19, tendo de conceder que a maravilhosa e elegante física clássica não era mais do que uma descrição aproximada do mundo natural. Afinal, eram já dois séculos de triunfos, iniciados com a formulação de Isaac Newton das leis de movimento e da atração gravitacional, em 1687, seguidas pela teoria de Faraday e Maxwell sobre as interações elétricas e magnéticas, e pela termodinâmica, a física que estuda o calor e sua transmissão. Esses grandes pilares da física clássica baseavam-se numa suposição fundamental: sistemas interagem trocando energia de forma contínua. Um jogador de futebol pode chutar a bola com a força que quiser. Uma panela d'água pode ser aquecida a qualquer temperatura entre 0C e 100C, quando a água ferve. Um pêndulo, como num relógio cuco, pode oscilar livremente, em qualquer ângulo. Um carro pode mover-se a qualquer velocidade, até alcançar sua velocidade máxima. Na física clássica, pode-se dar ou tirar energia de um sistema em qualquer quantidade. Na física quântica, não. O sucesso da física clássica era e é tão grande que muitos físicos, no final do século 19, acreditavam que não restava mais nada de importante a ser descoberto. Mas a festa durou pouco. Certas experiências produziram resultados que não eram explicados pela física clássica. Por mais que os físicos tentassem, eles não conseguiam entender o que estava acontecendo. Como a belíssima física clássica podia falhar tão miseravelmente? Uma nova física estava por nascer, contra a vontade da maioria. A

mecânica quântica nasceu de um parto induzido. Mas essa é a missão básica da ciência, explicar o mundo que está à sua volta, mesmo que essa explicação não seja agradável. A natureza não escolhe seus observadores. O homem é que tenta explicá-la com as únicas armas de que dispõe, intuição e lógica. O "corpo negro" Um dos problemas que afligiam os físicos era tão abstrato, aparentemente, que jamais poderia parecer relevante: a radiação de corpo negro. Antes de mais nada, o que é um "corpo negro"? Um forno com o exterior pintado de preto, por exemplo. Um objeto preto absorve muito mais radiação do que um de cor clara. O leitor pode comparar a temperatura dentro de dois carros, um preto e outro branco, deixados sob o sol de verão durante uma hora.

Um corpo negro é o objeto que absorve toda a radiação e não irradia nem reflete energia alguma. Os cientistas estavam interessados na radiação em seu interior, ou seja, com o que acontece quando suas paredes são aquecidas até uma certa temperatura. A idéia era que, com o calor, os átomos dessas paredes iriam vibrar, liberando radiação para o interior da cavidade. Aliás, um forno comum está repleto de radiação infravermelha, que chamamos de "calor". Essa radiação seria então reabsorvida pelas paredes, numa dança de emissão e absorção que levaria a um estado final de equilíbrio entre os átomos do forno e a radiação.

Segundo a física clássica, esse processo de emissão e absorção de radiação pelos átomos do forno deveria ser contínuo, como toda outra troca de energia na natureza. Os átomos poderiam emitir e absorver qualquer quantidade de energia transportada pela radiação. Infelizmente, e para o desespero de vários físicos, incluindo o alemão Max Planck, as previsões da física clássica contradiziam o que se media nos experimentos.

Para "ver" o que acontece dentro do forno, basta fazer um orifício na parede e medir as propriedades da radiação que escapa. A radiação é composta por ondas eletromagnéticas, que vão desde as ondas de rádio e microondas até os raios X e gama, passando pela luz visível. A única diferença entre elas é a frequência, menor para as ondas de rádio e maior para os raios gama.

Os resultados foram surpreendentes. Primeiro, a radiação não dependia do material de que o forno era feito ou de sua forma, apenas da temperatura. Mais ainda, para cada temperatura havia uma frequência dominante, emitida com mais potência do que as outras. Por exemplo, se a uma temperatura a luz vermelha dominava, a temperaturas maiores era a radiação ultravioleta. A física clássica não conseguia explicar esse comportamento, prevendo que maiores frequências iriam dominar a qualquer temperatura.

Após longa agonia, Planck encontrou a solução do impasse, que apresentou no dia 14 de dezembro de 1900 à Sociedade Alemã de Física: a troca de energia entre os átomos e a radiação não é feita de forma contínua, mas sim discreta. Os átomos só podem emitir e absorver radiação em pequenos pacotes, múltiplos de uma quantidade mínima determinada pela frequência -átomos trocam energia como os homens trocam dinheiro, em múltiplos de um centavo, cujo equivalente é o "quantum" de energia. Planck mostrou que, a uma dada temperatura, radiações de maior frequência, sendo mais energéticas, estão ausentes da radiação de corpo negro. Max Planck jamais poderia ter imaginado a revolução que sua idéia iria causar.

Marcelo Gleiser é professor de física teórica do Dartmouth College, em Hanover (EUA), e autor do livro "A Dança do Universo"