



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UFAM

FRANCISCO MIRANDA MONTEIRO JÚNIOR

**A “BORRACHA QUÂNTICA” APLICADA COMO ATIVIDADE
EXPERIMENTAL NO ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA PARA ALUNOS DO
ENSINO MÉDIO**

MANAUS, AM

2020

FRANCISCO MIRANDA MONTEIRO JÚNIOR

**A “BORRACHA QUÂNTICA” APLICADA COMO ATIVIDADE
EXPERIMENTAL NO ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA PARA ALUNOS DO
ENSINO MÉDIO**

Dissertação apresentada ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 04, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas e Universidade Federal do Amazonas, como requisito obrigatório para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Denilson Silva Borges

MANAUS, AM

2020



Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - Polo 4

Ata da 39ª Defesa de Dissertação

Aos dezoito dia do mês de março, do ano de dois mil e vinte e um, às nove horas, por webconferencia, ocorreu a Defesa da Dissertação do mestrando **Francisco Miranda Monteiro Junior**, intitulada “**A “borracha quântica” aplicada como atividade experimental no Ensino de Física Quântica para alunos do Ensino Médio**”, do curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Polo 4, das Instituições de Ensino Superior Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM). A Banca Examinadora foi composta pelo Prof. Dr. Denilson da Silva Borges (UFAM), Prof^a. Dr^a. Letícia Maria de Oliveira (UNIVASF) e Prof.^a Dr^a. Debora Coimbra (UFU). O Professor Dr. Denilson da Silva Borges, presidente, deu início aos trabalhos, convidando os membros a comporem a Banca Examinadora. O presidente fez a leitura dos procedimentos para defesa de dissertação, e convocou o mestrando para fazer a exposição de seu trabalho que, em seguida, foi arguido pelos membros da Banca Examinadora. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se privativamente e decidiu pela aprovação do trabalho. Ao final, os presentes foram chamados para tomarem conhecimento do resultado da avaliação, o presidente da banca comunicou ao interessado que feitas às devidas correções na dissertação, conforme sugestão da banca Examinadora, o discente é obrigado a entregar, na secretaria do polo 4, até sessenta (60) dias após a data da defesa, cinco (5) vias impressas e encadernadas no formato capa dura, e duas vias digitais em formato PDF, em CD, para os trâmites necessários à concessão do diploma, conforme Resolução Nº.47 - CONSUP/IFAM de 13 de julho de 2015. Nada mais havendo a tratar, foi lavrado a presente ata que, após lida e aprovada, será assinada pelos presentes.

Prof. Dr. Denilson da Silva Borges
Presidente- UFAM

Prof^a. Dr^a. Letícia Maria de Oliveira
Membro Externo - UNIVASF



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA
PROGRAMA NACIONAL DE MESTRADO EM ENSINO DE FÍSICA INSTITUTO
FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS



Profª. Drª. Debora Coimbra
Membro Interno - UFU

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ajudar a alcançar esta vitória tão importante para mim e para os meus familiares que tanto sonharam com este momento.

A minha mãe Fátima de Lourdes, ao meu pai Francisco Miranda, a minha esposa Priscila Monteiro, a minha irmã Tayline Dutra, a minha avó Nilza Dutra, a minha tia Magela Dutra e o seu esposo Manuel Medeiros e ao meu primo-irmão Gabriel Dutra. A todos que me incentivaram, me encorajaram, me ajudaram a juntos alcançarmos esta vitória que não é somente minha, mas de todos nós, pois vocês foram e são o meu alicerce, são o meu baluarte.

Aos meus colegas do programa de mestrado da turma de 2018, pois nos ajudamos e nos encorajamos a nunca desistir do nosso foco.

A todos professores do Mestrado Profissional em Ensino de Física – MNPEF polo 04, IFAM/UFAM, por sua inspiração, dedicação a nos ensinar, por acreditarem em mim e no meu potencial.

Ao professor Denilson Borges, um obrigado especial, pela orientação do trabalho produzido e pelo acompanhamento durante o desenvolvimento e supervisão deste trabalho de conclusão de curso, e antes de tudo por me amparar como orientador e pelo encorajamento.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio a este programa de mestrado.

A Escola Estadual Nathália Uchôa, na pessoa do gestor Rauney Rabelo pela confiança, oportunidade e amizade.

Agradeço a todos àqueles que de alguma forma, contribuíram para o êxito deste trabalho.

RESUMO

A “BORRACHA QUÂNTICA” APLICADA COMO ATIVIDADE EXPERIMENTAL NO ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA PARA ALUNOS DO ENSINO MÉDIO

Este trabalho é um relato de experiência sobre a aplicação de uma sequência didática para o ensino da física quântica para alunos do ensino médio que já tenham estudado óptica, ondulatória e eletricidade. Como forma de apoio para a sequência de ensino, foi desenvolvida uma atividade experimental intitulada a “borracha quântica”. Esta sequência de ensino foi elaborada com o intuito de melhorar o ensino de física quântica no ensino médio, que por si já é de difícil compreensão e de difícil acesso. O apoio encontrado está alicerçado em uma sequência de ensino que consiste em sete etapas (aulas) onde nestas etapas o processo de construção do conhecimento se divide em três ações: 1) A apresentação da situação-problema ao aluno e os objetivos que deveremos alcançar; 2) A apresentação dos objetos que farão parte da montagem do protótipo; 3) A montagem da atividade experimental: a “borracha quântica”. Também utilizamos duas avaliações com o intuito de analisarmos os conhecimentos prévios dos alunos e os conhecimentos adquiridos no fim de todo o processo de ensino e aprendizagem. Os resultados deste trabalho possibilitaram aprimorar a sequência didática desenvolvida que é reapresentada no Apêndice na forma de um produto educacional para auxiliar professores de física do ensino médio na abordagem do conceito de física quântica para seus alunos.

Palavras-chave: Ensino de física, física quântica, sequência didática e atividade experimental.

ABSTRACT

THE “QUANTUM ERASER” APPLIED AS AN EXPERIMENTAL ACTIVITY IN THE QUANTUM PHYSICS TEACHING FOR HIGH SCHOOL STUDENTS

This work presents an experience report on the application of a didactic sequence for teaching quantum physics to students high school students who have already studied optics, wave and electricity. As a form of support for the teaching sequence, an experimental activity was developed called “quantum rubber”. This teaching sequence was developed with the aim of adding more knowledge regarding the teaching of quantum mechanics, which in itself is difficult to understand and difficult to access. So the intention is to find support to teach something that can illustrate some effects, taking into account the impossibility of something concrete. The support found is based on a teaching sequence that consists of seven stages (classes) where in these stages the knowledge construction process is divided into three actions: 1) The presentation of the problem situation to the student and the objectives that we must achieve; 2) The presentation of the objects that will be part of the assembly of the prototype; 3) The setting up of the experimental activity: the “quantum rubber”. We also used two assessments in order to analyze the students' previous knowledge and the knowledge acquired at the end of the entire teaching and learning process. The results of this work made it possible to improve the didactic sequence developed, which is presented in the Appendix as an educational product to assist high school physics teachers in approaching the concept of quantum mechanics for their students.

Keywords: Physics teaching, quantum mechanics, didactic sequence and experimental activity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Extração do filme polarizador de uma tela LCD não utilizável.....	41
Figura 2: Apontador a laser verde.....	41
Figura 3: Ponta de grafite 0,5 mm.....	42
Figura 4: Suportes de isopor, anéis de laboratório e o pregador de roupa.....	42
Figura 5: Suporte borracha quântica, corresponde ao número 5 da figura e suporte para o laser que corresponde ao número 2 da figura.....	43
Figura 6: Identificador de caminho sem a ponta de grafite.....	44
Figura 7: Identificador de caminho com a ponta de grafite para esconder a abertura entre os dois polarizadores.....	44
Figura 8: “Borracha quântica” na horizontal e na vertical.....	45
Figura 9: “Borracha quântica em 45°.....	45
Figura 10: Atividade experimental da borracha quântica produzida por Francisco Miranda.....	45
Figura 11: Experimento de interferência.....	52
Figura 12: Filme polarizador direcionado na vertical.....	55
Figura 13: Filme polarizador direcionado na horizontal.....	55
Figura 14: Alunos manuseando o filme polarizador.....	55
Figura 15: Alunos ajustando a atividade experimental.....	59
Figura 16: Atividade experimental montada com o fio no caminho do laser.....	60
Figura 17: Franjas de interferência geradas pelo fio.....	60
Figura 18: Polarizador selecionando os fótons que passaram pelo lado direito. Direção: Horizontal.....	61
Figura 19: Polarizador selecionando os fótons que passaram pelo lado esquerdo. Direção: Vertical.....	61
Figura 20: Identificador de caminho em ação.....	61
Figura 21: Imagem formada pelo identificador de caminho.....	61
Figura 22: “Borracha quântica” em ação.....	62
Figura 23: “Borracha quântica” na vertical.....	63
Figura 24: Imagem formada na vertical da “borracha quântica”.....	63
Figura 25 : “Borracha quântica” na horizontal.....	64
Figura 26: Imagem formada na horizontal da “borracha quântica.....	64
Figura 27: “Borracha quântica” em 45°.....	64

Figura 28: Imagem formada em 45° da “borracha quântica”	64
Figura 29: 1° questão da avaliação diagnóstica.....	66
Figura 30: 2° questão da avaliação diagnóstica.....	67
Figura 31: 3° questão da avaliação diagnóstica.....	68
Figura 32: 4° questão da avaliação diagnóstica.....	70
Figura 33: 4° questão da avaliação diagnóstica feita por um aluno antes da aplicação da sequência de ensino.....	71
Figura 34: 4° questão da avaliação diagnóstica feita por um aluno antes da aplicação da sequência de ensino.....	71
Figura 35: 5° questão da avaliação diagnóstica.....	71
Figura 36: 6° questão da avaliação diagnóstica.....	72
Figura 37: 7° questão da avaliação diagnóstica.....	73

IMAGENS

Imagem 1: Interferência de ondas sonoras.....	23
Imagem 2: Função trabalho de alguns metais.....	28
Imagem 3: Esquema simplificado da montagem da borracha quântica.....	40
Imagem 4: Polarização em uma corda.....	53

GRÁFICOS

Gráfico 1: Análise da questão 1 (avaliação inicial)	67
Gráfico 2: Análise da questão 1 (avaliação final)	67
Gráfico 3: Análise da questão 2 (avaliação inicial)	68
Gráfico 4: Análise da questão 2 (avaliação final)	68
Gráfico 5: Análise da questão 3 (avaliação inicial)	69
Gráfico 6: Análise da questão 3 (avaliação final)	69
Gráfico 7: Análise da questão 4 (avaliação inicial)	70
Gráfico 8: Análise da questão 4 (avaliação final)	70
Gráfico 9: Análise da questão 5 (avaliação inicial)	72
Gráfico 10: Análise da questão 5 (avaliação final)	72
Gráfico 11: Análise da questão 6 (avaliação inicial)	73
Gráfico 12: Análise da questão 6 (avaliação final)	73
Gráfico 13: Análise da questão 7 (avaliação inicial)	74
Gráfico 14: Análise da questão 17 (avaliação final)	74
Gráfico 15: Comparativo entre as avaliações diagnósticas.....	74

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
1.1 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID AUSUBEL.....	15
1.1.1 APRENDIZAGEM POR RECEPÇÃO SIGNIFICATIVA.....	16
1.2 MODELO DE APRENDIZAGEM: ATIVIDADES EXPERIMENTAIS.....	20
2. UMA ABORDAGEM SOBRE OS PRINCÍPIOS DA FÍSICA QUÂNTICA.....	23
2.1 FATOS HISTÓRICOS.....	23
2.2 A TEORIA DE PLANCK.....	26
2.3 EFEITO FOTOELÉTRICO.....	28
2.4 A HIPÓTESE DE DE BROGLIE: DUALISMO ONDA-PARTÍCULA.....	29
2.5 PRINCÍPIOS: COMPLEMENTARIEDADE E INCERTEZA.....	31
3. PROPOSTA DE ENSINO DE FÍSICA QUÂNTICA PARA ALUNOS DO ENSINO MÉDIO.....	38
3.1 O QUE É A “BORRACHA QUÂNTICA”.....	38
3.2 A CONSTRUÇÃO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL: A “BORRACHA QUÂNTICA”.....	40
3.3 A SEQUÊNCIA COMO PROPOSTA PARA O ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA PARA ALUNOS DO ENSINO MÉDIO.....	46
4. APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA NO ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA PARA O ENSINO MÉDIO.....	51
5. ANÁLISE E DISCUSSÕES.....	67
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
APÊNDICE A-PRODUTO EDUCACIONAL.....	82

INTRODUÇÃO

Quando se trata da proposta de levar a física quântica no ensino médio, nos deparamos com uma grande dificuldade principalmente quando diz respeito a parte experimental. Costumamos elaborar alguma atividade experimental, com o objetivo de alcançarmos um melhor aprendizado de algum objeto de conhecimento, porém quase não encontramos ou nunca encontramos algo que seja de fácil elaboração, ou com poucos recursos.

As escolas de ensino básico, em sua maioria encontram-se com um grande déficit de laboratórios de ciências equipados com atividades experimentais no campo macroscópico da física. Quando se trata de campos microscópicos, nos deparamos com praticamente nada para esta área específica da física.

Estamos habituados a observar a natureza a partir de uma óptica macroscópica. Ou seja, observamos a natureza nos domínios da mecânica newtoniana. No nível quântico, construímos as leis físicas baseado no que observamos, ou melhor, nos fenômenos que a natureza nos revela: é o que chamamos de “observáveis”.

A atividade experimental da borracha quântica (apagador quântico) tem como objetivo uma possível visualização de algo que parece muito distante de se observar, ou muitas vezes de algo que julgamos ser abstrato, dentro de um contexto de probabilidade da natureza dual da luz.

Desta forma delimitamos o nosso obstáculo para o aprendizado de alguns conceitos básicos sobre a física quântica e com o intuito de alcançarmos uma forma de ensinar este conteúdo tão complexo, levantamos o nosso objetivo geral que consiste em:

- Elaborar uma proposta metodológica baseada em construir e aplicar a “borracha quântica” como atividade experimental no ensino da física quântica para alunos do ensino médio.

Para atingirmos esse objetivo central, delimitamos nossos objetivos específicos:

- ✓ Proporcionar aos alunos um contato direto com uma das questões mais fundamentais da física quântica, o comportamento dual da natureza.
- ✓ Explanar as definições do princípio da incerteza, princípio da complementariedade, interferência e o dualismo onda-partícula.

✓ Aplicar uma ferramenta que poderá auxiliar no processo de ensino e aprendizagem da física quântica, procurando vencer as possíveis dificuldades conceituais e epistemológicas próprias desta área de conhecimento.

A aplicação desta atividade experimental, que consiste em uma apresentação de dupla fenda, irá nos permitir explorar algumas características da física quântica, como observar que é impossível saber o caminho a ser escolhidos pelas partículas da luz (fótons), o princípio da superposição e interferência quântica.

Procurando alcançar as nossas expectativas, o nosso trabalho se divide em cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo a apresentação dos teóricos que serviram para fundamentar a execução da nossa proposta de ensino, destacando a aprendizagem significativa através de conceitos de David Ausubel com o intuito de focarmos na importância do estudo das definições, no nosso caso em definições básicas de princípios da física quântica, a fim de nos ajudar com a quebra de possíveis obstáculos epistemológicos presente no estudo desta ciência. Destacamos também a importância do uso dos modelos utilizados que são as atividades experimentais. Estas foram as ferramentas escolhidas para chegarmos a um resultado positivo.

No segundo capítulo destacando a física que compõe a física quântica, concentrando em momentos históricos que acabaram desencadeando nesta nova ciência. Este foi o caminho que encontramos para melhor chegarmos aos nossos objetivos em sala de aula, no que diz respeito a física quântica, fazendo uma analogia do passado ao cotidiano dos alunos. Neste capítulo desenvolvemos algumas definições importantes a respeito desta ciência.

No terceiro capítulo, apresentamos a proposta de ensino que utilizamos. Dando ênfase à vivência que foi esta experiência, onde também explicitamos a forma como construímos a nossa atividade experimental. Fizemos assim uma explanação do caminho feito tendo como eixo norteador a aprendizagem significativa através dos conceitos, passando a utilização do experimento para chegarmos as equações matemáticas iniciais que fazem parte da física quântica.

Explanaremos os passos escolhidos, explicando o objetivo de cada aula, conhecermos algumas das ferramentas e suas respectivas funções durante a execução da atividade experimental e por fim, o momento junto com os alunos de irmos montando aos poucos o nosso protótipo, a “borracha quântica”, colocando no experimento cada item estudado e a sua finalidade.

No quarto capítulo fizemos a aplicação da nossa sequência didática onde procuramos demonstrar um pouco do que foi o nosso momento de aprendizado diante de todo o processo que foi construído. De onde partimos desde a aplicação da avaliação diagnóstica inicial, passando pelos momentos de aprendizado e montagem da atividade experimental da “borracha quântica”.

Por fim, a análise dos dados que foram obtidos assim como os resultados que foram alcançados. Como objeto de análise, uma última avaliação aplicada nos alunos que participaram das etapas levantadas e defendidas no nosso trabalho, tendo como foco a análise desta proposta de ensino e aprendizagem para que se torne um modelo de ensino viável para utilização do ensino de física quântica para alunos do ensino médio.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há alguns anos o ensino da física tem-se deparado com algo desafiador, ao chegarmos nos conteúdos de física moderna. No ano final do ensino médio iniciamos, em geral, o planejamento anual com conteúdos da eletrostática, na sequência temos a eletrodinâmica e por fim o eletromagnetismo, restando poucas aulas para trabalharmos a física moderna.

Logo, percebe-se que a física moderna tem sido deixada de lado, algo que não poderia acontecer, pois quando se trata de tecnologia, os avanços estão acontecendo neste campo de atuação. Nosso trabalho é voltado para a explanação da física quântica e ao nos depararmos como tem sido o ensino desta ciência em escolas de ensino básico, percebemos a não existência de materiais de apoio pedagógicos voltados a física quântica. Logo, percebe-se a necessidade de explorar novas técnicas de ensino neste campo tão precário do ensino das ciências, em particular no ensino da física quântica. Tem-se necessidade de que o ensino deva acompanhar o próprio progresso da ciência, onde compartilhamos no mesmo ideal de Delizoicov & Angoti, onde temos que:

As ciências naturais, e a física em particular, enquanto área de conhecimentos construída tem uma história e uma estrutura, que uma vez aprendidas, permitem uma compreensão da natureza e dos processos tecnológicos que permeiam a sociedade. Qualquer cidadão que detenha um mínimo de conhecimento científico pode ter condições de utilizá-lo para as suas interpretações de situações de relevância social, reais concretas e vívidas, bem como aplicá-las nessas e em outras situações. (DELIZOICOV & ANGOTI, 1992, p.17)

Tendo em vista o ensino como sendo uma situação de relevância social, real, concreta e vívida, percebemos que muitos estudos são elaborados como um possível problema, como as dificuldades com relação ao ensino e aprendizagem. Ainda mais pelo fato de não termos instrumentos reais significativos de ensino quando a ciência é tão complicada de se entender e até mesmo de se ensinar, ou seja, logo teremos dificuldades quanto a aprendizagem

de fenômenos, leis e conceitos que cercam a compreensão básica dos fundamentos principais da física quântica.

No ensino médio a física quântica, em geral, é deixada para ser explanada no final do ciclo levando-se em consideração uma questão de datas (acontecimentos históricos e ordem cronológica). A física quântica, que é um dos conteúdos da unidade de ensino da física moderna, vem ser apresentada somente depois do eletromagnetismo, respeitando assim a ordem com que foi descoberta. Mas ao se tratar do ensino, percebe-se uma quantidade pequena de tempo para ser trabalhada, algo em torno de uma semana de aula, o que seria aproximadamente três aulas.

Ensinar a física quântica é um grande desafio, visto que a sua atuação está presente no estado microscópico, em dimensões microscópicas. Então, trazer para o estado macroscópico, ou digamos assim, trazer para conhecimento e visualização dos nossos alunos é o nosso grande desafio como professores de física.

Devido a esta condição da não atuação no estado microscópico, temos a certeza de que nós não temos como trabalhar com a física quântica do jeito que ela é, por natureza. Mas, como o intuito, de melhor explanação desta ciência que, é de grande importância tecnológica, fizemos uso de um recurso: uma atividade experimental denominada “borracha quântica”.

Esta atividade experimental foi retirada de um artigo científico “*A do it yourself quantum eraser*” dos professores Rachel Hillmer e Paul Kwiat. Onde os mesmos explicam como construir esta atividade em casa, e a utilizamos como ferramenta para o ensino da física quântica para alunos do ensino médio com o intuito de tentar explicar alguns conceitos deste nosso objeto de estudo.

O nosso trabalho consiste na utilização desta ferramenta (a borracha quântica) aplicada a uma sequência de ensino que visa uma melhor compreensão dos conceitos e princípios básicos da física quântica, para isso buscamos como eixo norteador do nosso trabalho a aprendizagem significativa de David Ausubel.

1.1 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID AUSUBEL

A nossa sequência de ensino irá alicerçar-se na aprendizagem significativa de Ausubel, voltada mais precisamente a questão da aprendizagem por recepção significativa, que consiste na aquisição de novos significados a partir de materiais de aprendizagem apresentado. Portanto trabalharemos com a ideia dos conceitos em comunhão com a atividade experimental e a sequência de ensino como sendo os materiais de aprendizagem significativa que Ausubel defende.

Para isso, precisamos entender qual a ideia de David Ausubel como aprendizagem significativa para então chegarmos a um resultado satisfatório do nosso relato de experiência.

1.1.1 Aprendizagem por recepção significativa

Propusemos uma sequência de ensino, portanto a aprendizagem do aluno será uma consequência. O resultado desta sequência de ensino, e não a atividade experimental, que estamos propondo será o motivo geral da aprendizagem, o produto da aprendizagem. A nossa proposta de ensino enquadra-se como uma forma de aprendizagem por recepção significativa de David Ausubel, pois segundo Ausubel:

Aprendizagem por recepção significativa envolve principalmente aquisição de novos significados a partir de material de aprendizagem apresentado. Exige quer mecanismo de aprendizagem significativa, quer a apresentação de material potencialmente significativo para o aprendiz. Por sua vez a última condição pressupõe que o próprio material de aprendizagem possa estar relacionado de forma não arbitrária e não literal com qualquer estrutura cognitiva apropriada e relevante e que a estrutura cognitiva particular aprendiz contém a ideia ancoradas relevante com as quais que se põe a relacionar o novo material. A interação entre novos significados de potenciais ideais relevantes na estrutura cognitiva do aprendiz dá origem a significados verdadeiros ou psicológicos. (ASUBEL, 1963)

A atividade experimental da borracha quântica faz parte do processo de ensino e aprendizagem, onde a mesma está para auxiliar no processo de ensino.

“A aprendizagem significativa não é sinônimo de aprendizagem de material significativo em primeiro lugar o material de aprendizagem apenas é potencialmente significativo em segundo deve existir o mecanismo de aprendizagem significativa” (AUSUBEL, 1963).

A borracha quântica, como a atividade experimental, se enquadra como este material significativo, não que ela seja a aprendizagem significativa, mas sim uma importante ferramenta para o processo de ensino e aprendizagem. E este mecanismo de aprendizagem significativa será uma sequência de aulas que iremos lecionar desde a apresentação de conceitos da luz, caminhando desde os gregos antigos até o mais aceito atualmente, a definição do laser, dos polarizadores da luz, os polaróides até adentrarmos no campo da física quântica, onde explicitaremos o efeito fotoelétrico e daremos mais ênfase a natureza dual da luz (dualidade onda-partícula). O nosso produto tem como finalidade os princípios básicos da física quântica, onde trataremos da definição e uma possível demonstração do que seria o princípio da complementaridade e o princípio da incerteza.

O motivo pelo qual escolhemos este tipo de aprendizagem significativa de Ausubel, é devido ao fato de trabalharmos apenas com a representação do que seria a física quântica. Tendo em vista que essa abordagem é embrionária com a física quântica em sala de aula ou fazer qualquer tipo de experimento nas escolas devido a sua atuação estar em um campo de difícil observação, porém, temos como fazer uma representação do que seria a ideia inicial da física quântica. Logo, uma forma de trabalharmos este tipo de aprendizagem significativa seria através dos conceitos, que são definidos por David Ausubel da seguinte forma:

Ao se definir os conceitos como objetos, acontecimentos, situações ou propriedades que possuem atributos específicos comuns e são designados pelo mesmo signo ou símbolo [...]. Os próprios conceitos consistem nos atributos específicos abstratos comuns a uma determinada categoria de objetos acontecimentos e fenômenos apesar da diversidade das dimensões que não as caracterizam os atributos específicos partilhados por todos os membros da categoria. (AUSUBEL, 1963)

Portanto, procuramos trabalhar as definições básicas da física quântica, apresentando aos alunos esta ideia através da parte conceitual. Para isso temos que saber definir e identificar quais os conceitos que serão trabalhados. Quais serão os conceitos mais evidentes e necessários para a explanação do nosso trabalho.

1.2 MODELO DE APRENDIZAGEM: ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

O instrumento de estudo que usamos para alcançar os nossos objetivos foi uma atividade experimental, pois no campo educacional estes se tornam aceitáveis se tiverem como objetivos uma facilitação quanto a compreensão, Astolfi & Develay (2001), afirmam que “a presença dos modelos em sala de aula é devido à necessidade que não satisfaz o simples estabelecimento de uma relação casual”. Os modelos permitem a compreensão da realidade a partir de duas perspectivas

1º) *“Substituindo as primeiras representações por variáveis, parâmetros e relações entre as variáveis, fazem com que se passe as representações de mais relacionadas e hipotéticas”.* (Astolfi & Develay, 2001, p.103).

2º) *“Identificando e manipulando bons sistemas, permitem descrever as variáveis de estado e de interação, as relações internas entre essas variáveis, os valores de imposições exteriores”.* (Astolfi & Develay, 2001, p.103).

Desta forma, podemos afirmar a importância do uso dos modelos no estudo das ciências em especial com relação a física quântica, facilitando a aprendizagem dos seus conceitos, ou melhor dos seus princípios, e também como forma de compreensão e visualização de conceitos abstratos. Pois segundo Martinand (1986) a utilização dos modelos possibilita ao aluno uma melhor aprendizagem da realidade.

Tomando como modelo, utilizamos as atividades experimentais com o intuito de favorecer a compreensão dos alunos quanto ao fenômeno físico.

Na prática educacional, o desenvolvimento das aulas que fazem uso das atividades experimentais é de grande importância no que diz respeito à construção de conceitos, tomemos então o conceito de atividade experimental e a sua importância, segundo Pinho Alves:

Seu papel no contexto escolar é oferecer a oportunidade ao estudante de conscientizar-se de que seus conhecimentos anteriores são fontes que ele dispõe para construir expectativas teóricas sobre um evento científico. Isto significa que a atividade experimental deve se constituir de tarefas que permitam gerar uma negociação sobre conhecimento, na constituição de valores coletivos para a construção do saber físico. A atividade experimental deve ser entendida como um objeto didático, produto de uma Transposição Didática de concepção construtivista da experimentação e do método experimental, e não mais um objeto a ensinar (PINHO ALVES, 2000, p.262).

Atividades experimentais nas aulas de ciências não são recentes, pois segundo Loedel (1949), “o método de ensino, quanto a dedução e indução do conhecimento e aprendizado dos conhecimentos físicos, relacionando as atividades experimentais é um fator preponderante no ensino das ciências naturais”.

Hodson descreve dez motivos para o uso das atividades experimentais nas aulas do ensino médio, onde segundo o mesmo são descritas como:

1. Estimular a observação acurada e o registro cuidadoso dos dados;
2. Promover métodos de pensamento científico simples e de senso comum;
3. Desenvolver habilidades manipulativas;
4. Treinar em resolução de problemas;
5. Adaptar as exigências das escolas;
6. Esclarecer a teoria e promover a sua compreensão;
7. Verificar fatos e princípios estudados anteriormente;
8. Vivenciar o processo de encontrar fatos por meio da investigação, chegando a seus princípios;
9. Motivar e manter o interesse na matéria;
10. Tornar os fenômenos mais reais por meio da experiência (HODSON, 1998, p.6)

Desta forma, a execução do nosso trabalho está norteadada em entendermos que a construção dos conceitos da física quântica pode ser feita através da aprendizagem significativa representacional, usando como modelo a atividade experimental da borracha quântica, podendo se alicerçar na ideia de conceitos através de uma sequência de ensino.

2. UMA ABORDAGEM SOBRE OS PRINCÍPIOS DA FÍSICA QUÂNTICA

Ao iniciarmos o estudo sobre determinado assunto/conteúdo, precisamos partir de um ponto inicial, para isso, para procurarmos ao menos entender a natureza de algo estranho como a física quântica, precisamos conhecer os pontos necessários de partida, ou seja, os princípios que regem esta parte da física.

Para que possamos trabalhar com este conteúdo, faremos neste capítulo uma abordagem dos conceitos que utilizaremos no decorrer da nossa sequência de ensino, com o intuito de alcançarmos a melhor compreensão deste ramo da física que tem despertado bastante interesse no nosso público.

2.1 FATOS HISTÓRICOS

O debate sobre a natureza da luz, corpuscular ou ondulatória, envolveu grandes estudiosos renomados a cerca deste episódio. Porém, nos ateremos em quatro destes grandes. São eles: Isaac Newton, Christian Huygens, Thomas Young e Augustin-Jean Fresnel. Acreditamos que estes são os fundamentais, dentre vários outros que contribuíram, para explicar este debate sobre a luz.

Além das contribuições fundamentais que fez na mecânica e na gravitação, Newton contribuiu bastante para o desenvolvimento teórico e experimental da Óptica. Hipótese levantada por Newton para a natureza da luz era de que este fenômeno era composto de feixes de corpúsculos que se transladavam no vácuo em linha reta. Estes corpúsculos poderiam penetrar em materiais transparentes e eram refletidos em superfícies de materiais opacos. A teoria corpuscular de newton explicava fenômenos da reflexão e da refração.

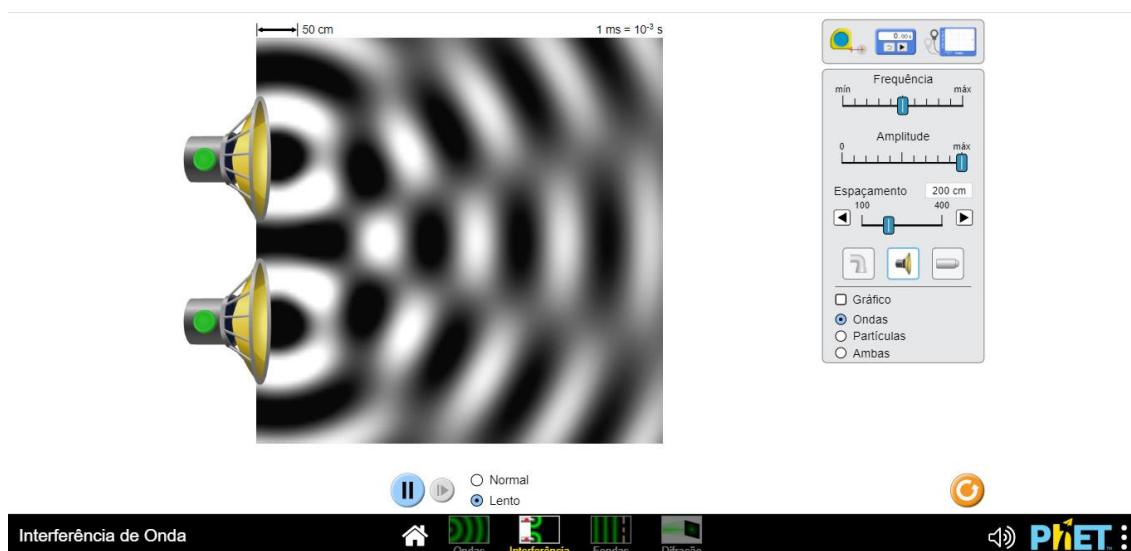
Porém, em 1670, Huygens retoma ao assunto sobre a natureza da luz sendo embasado no ponto de vista ondulatório de Hooke, que afirmava que na teoria de Hooke a luz também sofria reflexão e refração, porém a concepção de onda para a luz não era compatível com a ideia de vácuo, fazendo analogia as ondas sonoras que não se tem propagação no vácuo, para isso Hooke resgata o conceito de éter. Mas, supondo que a natureza da luz fosse ondulatória, por que não se consegue observar a difração? Onde segundo Ramalho (2003)

“difração é um fenômeno que corresponde à possibilidade de uma onda contornar um obstáculo, penetrando na região de sombra”.

Esta condição somada com o prestígio de Newton fez com que esta condição ondulatória para a natureza da luz, não fosse aceita. Mas ambos, tanto Newton como Huygens e seus contemporâneos concordaram em algo, a explicação para a propagação da luz tinha que obedecer a um modelo mecânico.

Alguns experimentos que se iniciaram em 1800 como o de Thomas Young que se estendeu até 1803, que foi quando foram publicadas suas observações sobre interferência e difração da luz, vem fazer voltar a atenção para o debate sobre a natureza da luz. O que Young descrevia em suas observações era que a composição de feixes de luz que saíam de duas fontes distintas, ao colidir em um anteparo, fazia reluzir padrões de intensidades parecidos como aos de interferência de ondas sonoras o que fez com que passassem a acreditar que os fenômenos da óptica seriam resultados de movimento ondulatórios em um meio etéreo. Na imagem a seguir temos uma animação que representam duas fontes de som que criam ondas mecânicas e na imagem onde ocorre interferência construtiva aparecem franjas iluminadas, ao passo que nos outros pontos em que ocorre interferência destrutiva aparecem franjas escuras. Esta animação encontra-se no laboratório de simulações PHET, https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-interference.

Imagem 1: Interferência de ondas sonoras.



Fonte: Simulador PHET, 2020.

Mas, apesar da publicação desta importante observação, o trabalho de Thomas Young possuía um caráter qualitativo, por este motivo suas conclusões não tiveram grande repercussão na época. Um contemporâneo a Young, Fresnel aplica a matemática dando um caráter quantitativo ao seu trabalho sobre a natureza da luz, faz com que as analogias a acústica sejam afastadas, assim como também afasta vários argumentos contra a teoria ondulatória da luz. Porém, temos uma ideia de que a luz possa ter natureza ondulatória, Segundo Francisco Caruso e Vitor Oguri,

[...] somente em 1826 que após uma série de experimentos e análises quantitativas que Fresnel fez, foi que se começa a aceitação da ideia de que a luz pudesse ser explicada como um fenômeno óptico, ou seja, que se começa a aceitar que a luz possa ser vista como um modelo ondulatório. (CARUSO, F. & OGURI, V ,2016)

Após esta série de experimentos e análises, assim como a aceitação sobre o modelo ondulatório, temos que segundo Edmund Whittaker (1951) “Do gênio de Young e Fresnel, a teoria ondulatória da luz foi estabelecida de modo tão forte que a partir de então a hipótese corpuscular não era mais capaz de recrutar qualquer novo adepto entre os jovens”.

E com isso, parecia ter chegado a um denominador em comum, acreditava-se ter encontrado a natureza da luz, naquele momento acreditava-se que a natureza da luz era ondulatória. A teoria corpuscular defendida por Newton e vários outros adeptos a esta teoria encontravam-se “derrotados”, depois de vários anos de estudos, comprovações experimentais e matemática, haviam cessado e mais um episódio da física encontrava o seu fim.

Nos anos finais do século XIV, os físicos acreditavam que os princípios fundamentais da física já haviam sido estabelecidos e que alcançava um estado de perfeição. A mecânica de Newton era capaz de descrever com enorme sucesso os movimentos dos corpos materiais incluindo os movimentos dos planetas em torno do sol.

A teoria eletromagnética de Maxwell descrevia com perfeição os fenômenos elétricos e magnéticos, a termodinâmica de Boltzmann somada aos elegantes e sofisticados tratamentos matemáticos apresentados por Lagrange e

Hamilton para a mecânica newtoniana ajudaram a definir os conceitos da física clássica. Finalizado o entendimento dos conceitos da física clássica, um físico da época muito aclamado pela comunidade científica, Lorde Kelvin, em uma conferência na Royal Society em março de 1900 declarou "não há mais nada que descobrir em física. Há apenas duas nuvenzinhas no horizonte da física", onde o mesmo escreveu um artigo cujo título do artigo é: "Nuvens do século dezenove sobre a teoria dinâmica do calor e da luz" (Lorde Kelvin, 1901).

As duas "nuvenzinhas" que Lorde Kelvin estava se referindo seriam o fracasso das experiências de Michelson e Morley ao medir a velocidade da luz através do éter em direções perpendiculares e a dificuldade em explicar a distribuição de energia na radiação de um corpo aquecido. Estas duas nuvenzinhas acabaram-se virando "tempestades" onde obtém-se: o nascimento da física moderna, a teoria da relatividade e a alguns problemas que deram origem à física quântica: a radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico, radiação eletromagnética dos átomos e o calor específico dos sólidos.

A teoria da relatividade especial de Einstein em 1905 veio nos mostrar que a mecânica clássica deixaria de ser válida no estudo de corpos que estejam viajando a uma velocidade comparável a da luz, pois segundo Henri Poincaré apud Francisco Caruso (2016) "A nova mecânica será caracterizada, acima de tudo, pela regra de que nenhuma velocidade pode exceder a velocidade da luz".

Mas para entendermos o surgimento da física quântica e os seus princípios, precisaremos citar alguns conceitos que constituem o processo de entendimento inicial e surgimento desta ciência tão curiosa.

2.2 A TEORIA DE PLANCK

Em dezembro de 1900, Max Planck (1858-1947) apresentou à Sociedade Alemã de Física um estudo teórico sobre a emissão de radiação de um corpo negro, no qual deduz uma equação plenamente em acordo com os resultados experimentais. Entretanto, a dificuldade encontrava-se na forma da função $f(v/T)$ da lei de deslocamento de Wien, dada por

$$u(v, T) = v^3 f\left(\frac{v}{T}\right)$$

As formas propostas por Wien

$$f\left(\frac{v}{T}\right) = C e^{-\beta v/T}, \quad (\text{válida para } \frac{v}{T} \gg 1)$$

e por Rayleigh-Jeans, segundo Abraham Cohen, temos que:

$$f\left(\frac{v}{T}\right) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{k_B}{v/T}, \quad (\text{válida para } \frac{v}{T} \ll 1)$$

Não tinham validade para todo o espectro. Sendo assim, uma nova função foi descrita por Planck, no qual teoricamente se introduz, teoricamente a noção de quantum de energia. As “partículas” de energia sugeridas por Planck foram denominadas “fótons”. A energia E de cada fóton é denominada quantum (no plural quanta) segundo Abraham Cohen:

$$f\left(\frac{v}{T}\right) = \frac{8\pi}{c^3} k_B \beta \frac{1}{e^{\frac{\beta v}{T}} - 1}$$

Obtendo então

$$u(v, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{v^3}{e^{\frac{hv}{k_B T}} - 1}$$

Sendo $k_B \beta \equiv h$ que é a constante de Planck. Ao integrar $u(v, T)$ sobre todas as frequências, entre 0 e ∞ , obtemos a densidade de energia total da radiação do corpo negro:

$$u(T) = \int_0^\infty u(v, T) dv$$

e chamando $x = \frac{hv}{k_B T}$, obtemos

$$u(T) = \left(\frac{8\pi k_B^4}{c^3 h^3} \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \right) T^4, \quad (\text{fórmula de Stefan})$$

“Para conseguir uma equação a qualquer custo”, teve que considerar a existência, na superfície do corpo negro, de cargas elétricas oscilantes emitindo energia radiante não de modo contínuo, como sugere a teoria clássica, mas sim em porções descontínuas. Partículas ou matéria que transportam, cada qual, uma quantidade E bem definida de energia. Segundo o próprio Max Planck:

“[...] Se E for considerada como uma grandeza que pode ser indefinidamente divisível, então a redistribuição pode ser feita de número infinito de modos. Nós, ao contrário (e este é ponto mais importante de todo o cálculo) consideraremos E como uma grandeza composta de um número bem

determinado de partes iguais finitas, e para isso usaremos a constante da natureza $h = 5,55 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$. [...]” (Planck, M., 1914)

Sendo assim, hoje podemos enunciá-lo como qualquer entidade física, cuja única coordenada que efetua oscilações harmônicas simples, ou seja, que seja uma função senoidal do tempo, somente pode ter uma energia total E que satisfaça a seguinte relação:

$$E = nh\nu$$

Nessa equação, h é a constante de proporcionalidade denominada constante de Planck, dada por $h = 6,63 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$, $n = 1,2,3,\dots$, e ν é a frequência de oscilação.

2.3 EFEITO FOTOELÉTRICO

Quando uma radiação eletromagnética incide sobre a superfície de um metal, elétrons podem ser arrancados dessa superfície. Esse fenômeno é denominado efeito fotoelétrico. Os elétrons arrancados são chamados fotoelétrons.

Einstein (1879-1955) explicou o efeito fotoelétrico levando em consideração a quantização da energia onde o mesmo sugere que a luz ou outra forma de energia radiante é composta de “partículas” de energia, os fótons. Com a palavra o próprio Einstein,

“[...] um fóton da radiação incidente, ao atingir o metal, é completamente absorvido por um único elétron, cedendo-lhe sua energia $h\nu$. Com essa energia adicional o elétron pode escapar do metal”. (EINSTEIN, 1905)

Segundo Einstein, “A quantização da energia usada por Planck, no problema do corpo negro era na verdade, uma característica universal da luz”. Em vez de estar distribuída uniformemente no espaço no qual se propaga, a luz é constituída por quanta discretos, de energia $h\nu$. Quando um desses quantas denominados *fótons*, chega à superfície, toda a sua energia é transferida para

um elétron. Se ϕ é a energia necessária para remover um elétron da superfície (ϕ recebe o nome de função trabalho e varia de metal para metal).

Imagem 2: Função trabalho de alguns metais.

Metal	Função trabalho (ϕ)
Sódio	2,28 eV
Alumínio	4,08 eV
Zinco	4,31 eV
Ferro	4,50 eV
Prata	4,73 eV

Fonte: JÚNIOR, F. R. & FERRARO, N. G. & SOARES, P. A. T. Os Fundamentos de Física. Vol. 3, 2003

A energia cinética máxima dos elétrons emitidos é dada por $h\nu - \phi$, devido a lei de conservação da energia. Portanto, temos que:

$$E_{c(\max)} = h\nu - \phi$$

Esta equação é chamada de equação do efeito fotoelétrico. Onde a energia cinética máxima dos elétrons emitidos está relacionada ao potencial de corte V_0 . Sendo assim, temos que,

$$E_{c(\max)} = \frac{1}{2}mv^2 = eV_0 = h\nu - \phi$$

2.4 A HIPÓTESE DE DE BROGLIE: DUALISMO ONDA-PARTÍCULA

Louis de Broglie expressou sua hipótese matemática por meio de equações para frequência e comprimento de onda das ondas de matéria hoje conhecidas como relações de De Broglie. Essa sugestão era altamente especulativa, uma vez que na época não havia nenhum indício experimental do caráter ondulatório dos elétrons ou de qualquer outra partícula. Nas palavras do próprio de Broglie:

“Depois da primeira guerra mundial pensei muito a respeito da teoria dos quanta e do dualismo onda-partícula... Foi então que tive uma súbita inspiração. O dualismo onda-partícula de Einstein era um fenômeno absolutamente geral que se estendia a toda natureza”. (DE BROGLIE, 1955)

Ainda de acordo com De Broglie, “é impossível imaginarmos uma quantidade isolada de energia sem associá-la com uma certa frequência.” Sendo assim partículas materiais devem também estar acompanhadas de ondas de fase, e em alguns casos, dar origem aos efeitos de interferência. Segundo o Abraham Cohen “Estas partículas materiais podem ser fótons, fazendo esta analogia, temos que a frequência das ondas de fase multiplicada pela constante de Planck deve ser igual a energia da partícula”. Desta forma, para o caso não-relativístico:

$$h\nu = \frac{p^2}{2m} + V \equiv E \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

onde E é a energia total, p o momento e λ o comprimento de onda de De Broglie da partícula no caso dos fótons essas equações podem ser obtidas a partir da equação do quanto de radiação proposta por Planck, $E = h\nu$ e também de $E = pc$, onde c é a velocidade da luz, logo temos que:

$$E = pc = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Considerando as definições para a frequência angular ω e o número de onda k , como:

$$\omega = 2\pi\nu$$

e

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

E que,

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

escrevemos as seguintes modificações para as relações de De Broglie, onde:

$$E = h\nu = \frac{h\omega}{2\pi} \quad \text{ou} \quad E = \hbar\omega$$

e

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\frac{2\pi}{k}} = \frac{\hbar k}{2\pi} \quad \text{ou} \quad E = \hbar k$$

Os conceitos clássicos de onda podem não representar a natureza dos elétrons ou dos fótons de maneira adequada, sendo mais preciso, o estado físico da onda-partícula pode não ser representado de forma adequada pela posição, momento, amplitude ou fase.

A descrição formal do estado em um sistema mecânico está melhor representada através de uma função de onda, Ψ , uma entidade matemática que brevemente será abordada. Ou seja, a hipótese de De Broglie para o dualismo onda-partícula se resume a seguinte situação: Se a luz apresenta natureza dual, uma partícula pode comportar-se de modo semelhante, apresentando também propriedades ondulatórias.

2.5 PRINCIPIOS: COMPLEMENTARIEDADE E INCERTEZA

Em 1927, Werner Heisenberg (1901-1976) que havia sido assistente de Max Born e considerado o pai da mecânica das matrizes. Ainda quando Heisenberg era jovem, Bohr havia divulgado a sua teoria do átomo, porém sem uma boa confirmação experimental. Heisenberg ao calcular a intensidade das linhas espectrais, também tentava solucionar um outro problema do modelo de Bohr. Pois, no modelo do Átomo de Bohr, a luz não era emitida em estado estacionário.

“A emissão da luz só aconteceria em uma transição de uma órbita “a” de raio r_a para uma órbita “b” de raio r_b . Temos que para que se possa calcular a intensidade que se pretendia obter, não teria como saber qual dos dois raios deveria ser utilizado. Então, a ideia que Heisenberg possuía para a solução de tal problema estaria na junção de “ r_{ab} ”, temos aqui um pouco de cada, cada órbita tendo a sua contribuição.” (F. AURINO, Org. M. Rocha, 2011)

Com esta ideia, Heisenberg estava introduzindo maneira de solução na nova teoria quântica.

Sendo assim foi possível calcular tanto a frequência como a intensidade de cada linha espectral do átomo de hidrogênio. E desta forma encontrando resultados bem próximos aos que eram observados em dados experimentais.

Também com estes cálculos, foi possível observar que dadas duas grandezas os resultados nem sempre comutavam. Esta propriedade matemática o levaria a introduzir um outro princípio fundamental da física quântica, **o princípio da incerteza**.

Heisenberg, Born e Jordan (um dos assistentes de Born) escreveram juntos um artigo denominado “Mecânica das Matrizes”, onde eles afirmavam que matrizes que representavam uma coordenada “**q**” de uma partícula e o seu momentum “**p**” não comutavam, porém satisfaziam a seguinte relação:

$$qp - pq = \frac{ih}{2\pi} I, \text{ onde } I \text{ representa a matriz identidade,}$$

O h será a constante de Planck e i será o número imaginário puro. Sendo que apesar do cálculo de matrizes ser bastante conhecido, esta formulação matricial da física quântica, além de ser bem específica, apresentou-se, em muitos casos bem difícil.

Uma vez aceita a interpretação probabilística de Born, Heisenberg estabeleceu algumas relações de vínculo entre as incertezas das componentes da posição e do momentum de uma partícula. De acordo com o próprio Heisenberg “[...] é impossível determinar com precisão a posição (x) e o momentum (p_x) de um objeto quântico, ao mesmo tempo”.

Este princípio nos mostra que ao se elaborar uma experiência com a finalidade de determinar com clareza a posição, a medida do momentum ou a velocidade, fica bastante incerta. E quando se tenta o contrário, ou seja, medir o momentum ou velocidade, neste caso a posição fica bastante imprecisa. Segundo Abraham Cohen “A medida da posição x com uma precisão Δx , isto é, a partícula pode estar localizada no intervalo

$$x - \frac{1}{2} \Delta x \leq x \leq x + \frac{1}{2} \Delta x;$$

As relações de Heisenberg indicam que o produto das incertezas na posição Δx e no momentum Δp_x (o mesmo podendo ser feitos para os seguintes

pares de coordenadas: $y, \Delta p_y$; e $z, \Delta p_z$) num determinado instante satisfaz à seguinte desigualdade:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar$$

No interior de tal relação está implícita a impossibilidade de se encontrar, simultaneamente, “onda” e “partícula”, ao mesmo tempo em um certo objeto quântico. Os erros ou incertezas nas medidas simultâneas, não se referem as limitações dos aparelhos de medidas usados. As incertezas que aparecem nas relações são devidas ao próprio ato de medição em si. Quanto maior for o nível de conhecimento que tivermos da quantidade x menor será ao correspondente Δp_x .

Ao considerarmos um pacote de onda, movendo-se sob o eixo x , temos que:

$$f(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(k) e^{i(kx - \omega t)} dk, \text{ onde } \omega = \omega(k),$$

onde ainda não conhecemos a função $\omega(k)$. E a função $g(k)$ deve ser diferente de zero e em torno de $k = k_0$. Sendo assim, temos a seguinte condição:

$$g(k) \neq 0, \text{ se } k_0 - \varepsilon \leq k \leq k_0 + \varepsilon, \text{ onde } \varepsilon \ll k_0.$$

Com esta condição, vale a expansão da função $\omega(k)$, em série de potências em torno de $k = k_0$:

$$\omega(k) = \omega_0 + (k - k_0) \left(\frac{d\omega}{dk} \right)_{k=k_0} + (k - k_0)^2 \left(\frac{d^2\omega}{dk^2} \right)_{k=k_0} + \dots$$

Usando esta expansão até a primeira ordem em $(k - k_0)$, temos que:

$$f(x, t) \approx \int_{-\infty}^{\infty} g(k) e^{ikx} e^{i\left[kx - \omega_0 - (k - k_0)\left(\frac{d\omega}{dk}\right)_{k=k_0}\right]} dk$$

Reescrevendo-a teremos:

$$f(x, t) \approx e^{i(k_0 - \omega_0)t} \int_{-\infty}^{\infty} g(k) e^{i(k - k_0)\left(x - \frac{d\omega}{dk}t\right)} dk$$

Se não fosse o fator de fase que aparece multiplicando a integral, podemos dizer que a função $f(x, t)$ tem a forma

$$f(x, t) = f\left(x - \frac{d\omega}{dk}t\right).$$

Em 1926, o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) que desenvolvia estudos em física estatística dos gases e das radiações, tomara conhecimento da tese de De Broglie o que despertou interesse na busca de uma equação de movimento para as ondas de matéria.

Seu trabalho, que hoje é denominado como equação de Schrödinger (a mais famosa formulação matemática da física quântica) foi o fruto de uma série de sete artigos publicados, todas as etapas constam-se nestes artigos.

A equação de Schrödinger é uma equação diferencial parcial de primeira ordem no tempo e de segunda ordem nas coordenadas espaciais, utilizada para descrever as ondas de matéria e tem como solução a chamada função que é também conhecida como função psi (Ψ). É esta função que ondula no espaço e contém, a princípio, todas as informações sobre o estado de um dado sistema físico.

Já temos que o movimento de uma partícula pode ser descrito por uma onda e que a natureza da função de onda, ainda desconhecemos. No entanto, de acordo com a física clássica, fenômenos ondulatórios são regidos por uma equação geral, no qual a função de onda corresponde a uma determinada solução. Portanto, qual a equação que a função $f(x, t)$ consegue satisfazer? Para encontrarmos uma solução, faremos algumas substituições:

$$\begin{aligned}
 k &\rightarrow p \\
 \omega &\rightarrow \frac{E}{\hbar} \\
 f(x, t) &\rightarrow \Psi(x, t) \\
 g(k) &\rightarrow \phi(p).
 \end{aligned}$$

Assim, temos que:

$$\Psi(x, t) = \int \phi(p) e^{i(\frac{p}{\hbar}x - \omega t)} dp = \int \phi(p) e^{\frac{i(px - Et)}{\hbar}} dp$$

Derivando $\Psi(x, t)$ em relação ao tempo, encontramos:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \int \phi(p) E e^{\frac{i(px - Et)}{\hbar}} dp = -\frac{i}{\hbar} \int \phi(p) \left[\frac{p^2}{2m} + V(x) \right] e^{\frac{i(px - Et)}{\hbar}} dp$$

Ajustando, temos:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{2m} \left[\int \phi(p) p^2 e^{\frac{i(px - Et)}{\hbar}} dp \right] + V(x) \Psi(x, t)$$

Se utilizarmos $\frac{p^2}{2m} + V(x) = E$. O termo que está entre colchetes, poderá ser representado como a segunda derivada de Ψ em relação a x , ou seja:

$$\int \phi(p) p^2 e^{\frac{i(px - Et)}{\hbar}} dp = -\hbar^2 \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2}$$

Reagrupando os termos, obtemos:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x) \Psi(x, t)$$

A equação que procurávamos e que foi obtida pela primeira vez por Schrödinger. Esta equação contém todas as informações possíveis do estado de uma partícula de massa m com uma energia potencial $V(x,t)$; Mostra onde é mais provável de se encontrar a partícula e onde é quase nulo em outro; e a mesma sugere que as devidas interpretações devem ser feitas em termos estatísticos.

Segundo Aurino Filho “A notícia do surgimento de uma equação para as ondas de matéria chegou ao instituto de física teórica, em Copenhague, fundado por Niels Bohr”. Schrödinger recebia o convite para visitar aquela instituição e debater com Bohr e seus companheiros matemáticos e químicos. A partir de tais discussões, surgiria a *tese de complementariedade* ou **princípio da complementariedade**, que tinha o objetivo de dar uma interpretação mais ampla a nova teoria.

“A dualidade onda-partícula era uma manifestação de que as propriedades ondulatória e corpuscular de um objeto quântico constituem aspectos complementares do seu comportamento. É impossível encontrar-se uma experiência em que estes dois atributos diferentes entrassem em conflito, ou seja, o caráter de partícula ou de onda de uma entidade física é complementar e não pode ser exibido ao mesmo tempo”. (BOHR, Niels. apud Borges De Meneses, Ramiro D. 2008)

No centro do princípio da complementariedade estava a impossibilidade de se utilizar, ao mesmo tempo, certos conceitos da física clássica aplicados a física quântica. No mesmo ano, 1926, Max Born apresentou um trabalho, uma interpretação probabilística envolvendo a função de onda (Ψ) de Schrödinger. Born chegou à conclusão que no mundo atômico o determinismo clássico deveria ser deixado de lado, abandonado. A partir disso, a função ondulatória de Schrödinger, além de caracterizar o estado quântico da partícula é também um exemplo partícula de amplitude de probabilidade, ou seja, implica a possibilidade de se descobrir uma partícula numa dada posição x .

A partir de tal interpretação, foi caracterizada também como uma teoria probabilística, ou seja, ela não diz com certeza o que acontece quando um experimento é realizado.

Na física quântica, o estado de uma partícula (ou qualquer estado microscópico) é representado por uma função de onda Ψ , dependente das coordenadas de posição. Através desta função não é possível saber onde está localizada a partícula, mas de determinar, apenas, a probabilidade de encontrá-la em um certo ponto no espaço. Para Niels Bohr, esta interpretação probabilística era de grande significado físico e expressava a realidade dos quanta.

No capítulo seguinte trabalhamos a proposta da nossa sequência de ensino que tratará dos princípios fundamentais da física quântica no ensino médio, sob uma perspectiva de conceitos e atividade experimental.

3. PROPOSTA DE ENSINO DE FÍSICA QUÂNTICA PARA ALUNOS DO ENSINO MÉDIO.

A nossa proposta de sequência de ensino foi aplicada em sete passos que chamaremos também de aulas, nesse caso sete aulas. Cada aula foi elaborada para um tempo médio de 45 minutos, visando uma melhor compreensão de alguns conceitos. Escolhemos aplicar esta sequência de ensino em alunos que já estudaram a mecânica, óptica e eletromagnetismo. Como o intuito está em procurarmos entender os princípios básicos desta ciência, acreditamos que esta quantidade de aulas e os requisitos básicos serão suficientes e necessários.

O processo escolhido envolve a análise da proposta desenvolvida, a análise das atividades realizadas de acordo com o que foi estudado e duas avaliações diagnósticas: Avaliação Diagnóstica Inicial (ADI) e a Avaliação Diagnóstica Final (ADF). As avaliações foram elaboradas para analisar o processo como um todo.

Iniciaremos comentando a respeito da nossa atividade experimental, a “borracha quântica”. A sua produção e o que de fato se trata esta atividade experimental.

3.1 O QUE É A “BORRACHA QUÂNTICA”

A “borracha quântica” é um equipamento simples, onde podemos produzi-lo em casa e que tem como finalidade ilustrar alguns efeitos da física quântica. Já é de nosso saber que a forma como a teoria da física quântica tenta explicar o funcionamento de mundo seja bem estranha, onde o senso comum ou nossas capacidades de percepção se sintam incapacitados de tal compreensão, como por exemplo: como um objeto consegue percorrer dois caminhos ao mesmo tempo ou também objetos que não possuem velocidades e posições precisas. Alguns comportamentos que a teoria nos dá, mas que para nós não passam de dúvidas.

E este comportamento estranho, ainda parece bem distante do nosso cotidiano, pois os efeitos quânticos são mais evidentes quando se trata de sistemas microscópicos envolvidos, como o elétron orbitando em um átomo. É de saber público que os fenômenos quânticos permeiam para o que temos de mais moderno em tecnologia e que também várias esquisitices quânticas podem ser demonstradas em laboratório apropriados devidamente.

Para um melhor esclarecimento sobre estes comportamentos estranhos é que produzimos este equipamento simples (a borracha quântica) que tem como efeito uma característica própria da física quântica: a capacidade de realizar ações que mudam nossa interpretação do que aconteceu em eventos passados.

Antes de passarmos a conhecer os efeitos da “borracha quântica” é preciso lembrar que é necessário saber que os padrões de luz que irão ser vistos devem ser explicados considerando a luz como uma onda clássica, no momento sem envolver física quântica, logo a natureza quântica não pode ser demonstrada completamente. Além disso, os fótons que compõem a onda de luz, ao atravessarem o equipamento não serão detectados um a um, isto está longe das nossas possibilidades. Mas, ainda assim é possível observar os resultados e representá-los em termos de fótons individuais, ou seja, poderemos ter uma boa ideia da padronização do comportamento dos fótons.

O comportamento de um objeto quântico é bem inusitado, onde depende daquilo que queremos saber ao seu respeito. O elétron pode se comportar como partícula ou como onda, dependendo de como faremos a montagem e a sua submersão experimental. Ou seja, ao definirmos a sua trajetória teremos a sua ação como partícula e se caso isso não acontecer, teremos o seu comportamento ondulatório.

Este evento encontra-se no experimento de dupla fenda (e a “borracha quântica” é semelhante ao experimento, mas não as duas fendas). A borracha quântica é um instrumento que pode apagar a informação do trajeto escolhido por cada partícula, restituir a incapacidade de saber por onde a partícula passou e recuperar o padrão de interferência.

Para que possamos afirmar por qual caminho a partícula escolheu seguir, é necessário a afirmação por qual fenda ela escolheu passar. Isto é, deveríamos

ser capazes de calcular a posição do fóton quando ele se dispersou antes de passar pelas fendas. Mas, segundo o princípio da incerteza de Heisenberg, se medirmos com precisão o momento do fóton, sua posição se tornará mais imprecisa.

A partir disso, se fizermos o fóton atravessar uma lente que permita observar com precisão o seu momento, os dados sobre a sua posição serão apagados. E quando isso acontece, os dois trajetos a serem seguidos pela partícula se tornam indistinguíveis e o padrão de interferência será restaurado.

Citamos a respeito dos dados da posição que serão apagados devido a observação precisa do momento. Ao detectar a posição saberemos por qual fenda a partícula passou, o que significa que realmente atravessou uma fenda ou a outra fenda, e não as duas. Agora se, ao medirmos várias vezes o momento e encontrar o padrão de interferência, deduziremos que os fótons devem ter atravessado as duas fendas.

Se nos perguntarmos “a partícula passa por uma ou pelas duas fendas?”. A resposta para esta pergunta saberemos se observarmos o que acontece com o fóton depois de ter passado pela fenda. Isto é, é como se nossas ações com as partículas influenciassem nos acontecimentos passados.

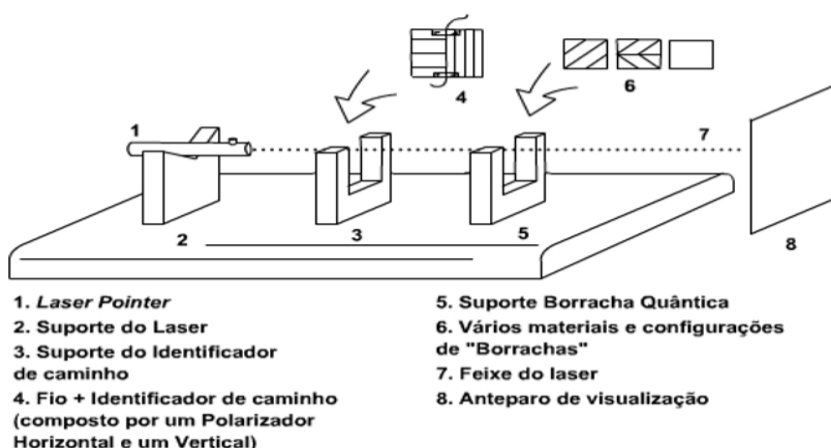
O que veremos no final da aplicabilidade do nosso equipamento será o padrão de interferência, mas para ver a interferência das partículas depois de aplicar a “borracha quântica”, precisaremos dividi-las em dois grupos e observar, de maneira separada. Um grupo irá mostrar o padrão original de franja, o outro um padrão inverso, e os dois grupos combinados irão preencher os espaços vazios do anteparo, fazendo com que a interferência desapareça. Esta divisão de grupos acontecerá de forma automática porque um desses grupos será bloqueado por um polarizador, e assim poderemos ver o padrão de interferência dos dois grupos, um bem próximo do outro.

3.2 A CONSTRUÇÃO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL: FAÇA VOCÊ MESMO UMA BORRACHA QUÂNTICA

O nosso trabalho foi baseado em um artigo publicado na Scientific American Internacional em maio de 2007, intitulado como “A do it yourself quantum eraser” (faça você mesmo uma borracha quântica) por Rachel Hillmer e Paul Kwiat. Retiramos a ideia para a realização deste trabalho e a transformamos em uma sequência de ensino para alunos do ensino médio e curiosos que queiram se aventurar ou conhecer um pouco desta área da física.

Mas, o processo para a construção da nossa “borracha quântica” procurou inspiração na produção de Jorge Facciopieri Junior do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas.

Imagem 3: Esquema simplificado da montagem da borracha quântica



Fonte: Jorge Facciopieri Junior, 2010.

No qual lendo o seu trabalho intitulado como “CONSTRUÇÃO DE UMA BORRACHA QUÂNTICA”, conseguimos então encontrar um norte para a produção da nossa “borracha quântica”.

Para a produção e aplicação da nossa borracha quântica, tivemos que adequar o nosso espaço de aplicação, como trata-se de uma sequência de ensino a nossa produção foi executada em uma sala de aula, onde procuramos ao máximo atender as necessidades para aplicabilidade da atividade experimental. Sendo assim construímos a nossa borracha quântica da seguinte forma:

MATERIAIS UTILIZADOS

- 1- Local escuro e um anteparo: Esta é uma condição necessária, no nosso caso, escolhemos trabalhar em uma sala de aula onde a luminosidade é de pouca intensidade.
- 2- Filmes polarizadores: Este material retiramos de tela de LCD de monitores da escola que já não funcionavam mais. Trata-se de uma película escura, fácil de ser encontrada, mas se faz necessário um cuidado na hora da extração do material. Nós fizemos a retirada com um estilete (veja a figura 1).

Figura 1: Extração do filme polarizador de uma tela LCD não utilizável.



Fonte: Própria, 2019.

- 3- Laser-pointer: Utilizamos um laser comum, desses utilizados em apresentações de coloração esverdeada e com comprimento de onda de aproximadamente 532 nm (figura 2).

Figura 2: Apontador a laser verde.



Fonte: Própria, 2019.

- 4- Fio fino: Quanto mais fino for o fio melhor será a apresentação das franjas a serem formadas. Demos preferência por pontas de grafites

de lapiseiras de 0,5mm (figura 3), mas sua única desvantagem é a sua fragilidade, quebram com muita facilidade. Porém é o que tínhamos no momento.

Figura 3: Ponta de grafite 0,5 mm.



Fonte: Própria, 2019.

- 5- Suportes: para os suportes utilizamos diversos materiais como: Isopor, fita adesiva, anéis de suportes universais para laboratório de diâmetro 5 cm, pregador de roupa e madeira (figura 4).

Figura 4: Suportes de isopor, anéis de laboratório e o pregador de roupa



Fonte: Própria, 2019.

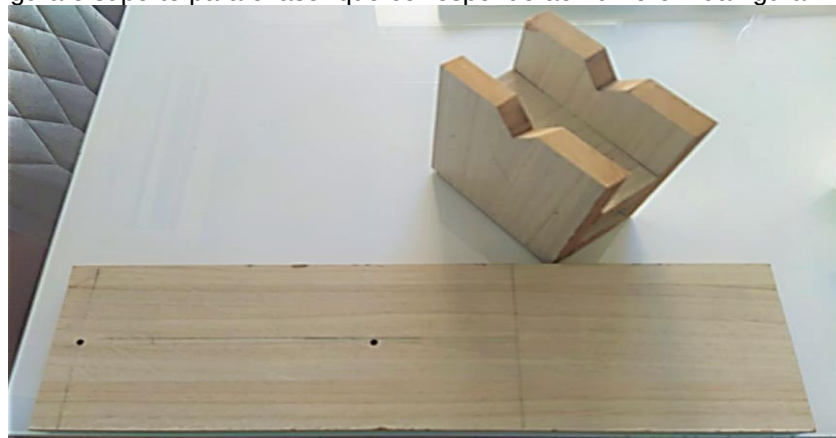
PASSOS DO PREPARO:

- 1- Iniciamos o preparo para a execução do aparato com os suportes. Os suportes (figura 5) a princípio foram confeccionados em casa antes de serem levados para a escola. O motivo seria o fato da utilização de

materiais como serrote, martelo e furadeira que não são permitidos o manuseio pelos alunos na escola. Utilizamos madeira como base com 50 cm de comprimento e 14 cm de largura para a atividade experimental e para confeccionar uma base para o laser pointer (com a finalidade de apoiar o laser sem termos que ficar segurando).

- 2- Em seguida furamos o suporte com o intuito de colocarmos os anéis de suporte de laboratório, a uma distância de aproximadamente de 20 cm.

Figura 5: Suporte borracha quântica, corresponde ao número 5 da figura e suporte para o laser que corresponde ao número 2 da figura.



Fonte: Própria, 2019.

- 3- Finalizada a estrutura da base, partimos para outro suporte. O suporte do identificador de caminho e da borracha quântica. Utilizamos o isopor com dimensões externas 10 cm x 10 cm e interna 5 cm x 5 cm. Como temos um identificador de caminho e duas borrachas quânticas, confeccionamos 3 suportes de isopor.
- 4- O corte e identificação do filme polarizador: Depois de extraído o filme polarizador, cortamos ele em pedaços pequenos e tomamos cuidado para a identificação.

O primeiro corte foi o identificador de caminho, onde cortamos dois pedaços do polarizador em dimensões de 3,5 cm x 7,5 cm, porém esse corte não pode ser feito de qualquer jeito, o cuidado está no direcionamento do polarizador, identificamos com V de vertical e H de horizontal. Utilizamos de fita adesiva para unirmos ao máximo os polarizadores como mostrado na figura 6 e em um segundo momento ainda com o identificador colocamos o nosso fio fino, a ponta de grafite

de 0,5 mm, ela é posta bem na divisa do identificador de caminho. O intuito dela neste momento da confecção concentra-se em esconder o espaço deixado entre os dois polarizadores conforme mostrado na figura 7.

Já os outros cortes que seriam o segundo e o terceiro. O segundo corte seria um pedaço do polarizador de dimensões 3,3 cm x 7,5 cm, o identificamos apenas como horizontal, conseqüentemente o oposto seria o vertical (Fig. 8) e o terceiro corte foi feito dimensões de 6,5 cm x 7,5 cm, o diferencial deste corte foi que o extraímos formando um ângulo de 45°e para identificação deste polarizador fizemos um corte em uma das pontas, para identifica-lo como sendo o polarizador de 45°.

Estes dois últimos cortes são as nossas “borrachas quânticas”.

Figura 6: Identificador de caminho sem a ponta de grafite.



Fonte: Própria, 2019.

Figura 7: Identificador de caminho com a ponta de grafite para esconder a abertura entre os dois polarizadores.



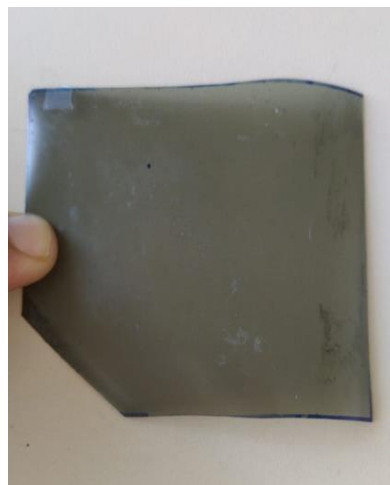
Fonte: Própria, 2019.

Figura 8: “Borracha qunântica” na horizontal e na vertical.



Fonte: Própria, 2019.

Figura 9: “Borracha quântica de 45°.



Fonte: Própria, 2019.

5- Em seguida, grudamos nosso identificador de caminho e as nossas “borrachas quânticas” no isopor (suporte). O pregador de roupa tem como finalidade pressionar o botão do laser pointer com o intuito de mantê-lo ligado, sem a necessidade de ficarmos pressionando.

E por fim, a nossa atividade experimental está pronta para ser utilizada conforme a figura 10.

Figura 10: Atividade experimental da borracha quântica produzida por Francisco Miranda.



Fonte: Própria, 2019.

3.3 A SEQUÊNCIA COMO PROPOSTA PARA O ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA PARA ALUNOS DO ENSINO MÉDIO

Finalizada a confecção da nossa atividade experimental, partimos para a explanação da sequência de ensino escolhida como proposta para se ensinar física quântica para alunos do ensino médio tendo um foco nos conceitos básicos e buscando apoio em um modelo, que seria neste caso, a nossa atividade experimental.

A nossa sequência de ensino conta com 7 passos ou sete aulas, que são elas:

1º Aula: 1º Avaliação diagnóstica

Objetivo: Avaliar o conhecimento prévio dos alunos com relação à física quântica.

Procedimento didático: Iniciou-se com a recepção dos alunos, explicando a eles que faremos uma avaliação com o intuito de analisar o que eles conhecem e entendem sobre o significado de alguns conceitos da física quântica. Para conseguir obter estes registros realizou-se a 1ª avaliação diagnóstica, onde não precisa se identificar e o tempo para a realização desta avaliação será de 45 minutos. A 1ª avaliação diagnóstica consta de 7 questões objetivas e que foram utilizadas em vestibulares e esta avaliação diagnóstica encontra-se no anexo A.

2º Aula: Luz e radiação eletromagnética

Objetivo: Explanar sobre a evolução dos conceitos da luz até chegarmos a ideia de radiação eletromagnética.

Procedimento didático:

1º momento: Passearemos sobre a visão de algumas diferentes épocas e de alguns diferentes povos, a procura de um conceito para o que é a luz e do que ela é formada, utilizamos apresentações em power point para conseguirmos visualizar o roteiro de pensamento de alguns povos antigos até o embate entre Newton e Huygens, ou seja, levantando a discussão se a luz é de natureza ondulatória ou corpuscular. Nesta aula, se faz necessário o debate entre essas duas formas de definições. Definimo a interferência com um vídeo sobre ondas mecânicas e através de imagens definição da luz como onda segundo Huygens.

2º momento: A definição da luz como onda eletromagnética com o intuito de chegarmos à explanação da radiação eletromagnética e apresentamos neste um dos materiais utilizados na nossa atividade experimental, o laser pointer. Inicia-se a montagem das bases de madeira e onde o laser pointer irá ficar localizado.

3º Aula: Polarização da luz

Objetivo: Comentar a ideia da polarização, os polarizadores e a polarização da luz.

Procedimento didático:

1º momento: A conceituação do termo polarização em demais esferas sociais é de grande ajuda para conseguirmos atingir o nosso objetivo maior desta aula que será de definir a polarização da luz, para isso começaremos com diferentes exemplos da palavra polarização empregada em no âmbito social. Passaremos para uma animação computacional sobre a polarização agindo em uma corda.

2º momento: A visualização do vídeo “Como identificar a película polarizadora correta” que se encontra no seguinte endereço eletrônico aberto ao público, <https://www.youtube.com/watch?v=42VYx4E21mk>. Este vem nos ajudar a observar principalmente a importância do emprego correto do filme polarizador. Além de nos mostrar o comportamento se for colocado de forma inadequada. E então, chegaremos a definição da polarização da luz, o seu comportamento e os seus efeitos como onda eletromagnética.

3º momento: Finalizado os dois momentos, nos voltamos para a nossa atividade experimental, onde colocaremos os polarizadores nos suportes, identificaremos o identificador de caminho e as “borrachas quânticas”.

4º Aula: Introdução histórica

Objetivo: Compreender o momento do surgimento da física quântica.

Procedimento didático:

1º momento: Iniciaremos comentando o momento em que a física passava, comentaremos a conferência na Royal Society em março de 1900 onde se debateu a “completude” da física pelo nobre cientista Lorde Kelvin. Continuamos citando as dificuldades e os problemas a serem solucionados da época, até chegarmos aos dois problemas que deram início ao surgimento da teoria da relatividade e da física quântica.

2º momento: passaremos a comentar mais fortemente o assunto que diz respeito a física quântica (corpo negro, a teoria dos quanta, efeito fotoelétrico, a natureza da luz, dualidade onda-partícula e os princípios da física quântica).

Os dois primeiros momentos foram voltados a explanação de conceitos relacionados ao estudo e compreensão da parte introdutória da física quântica.

5º Aula: Dualidade onda-partícula

Objetivo: Explanar a ideia de dualidade e o que seria a dualidade onda-partícula para a física quântica.

Procedimento didático:

1º momento: fizemos uma breve introdução explicando o que seria a dualidade, procurando trazer como lembrança o que foi estudado anteriormente (os fatos históricos), comentamos o experimento de fenda dupla através de animações computacionais. E por fim, deste primeiro momento, adentramos nos conceitos da dualidade onda-partícula, explanando a hipótese de De Broglie e os princípios da complementariedade e da incerteza.

2º momento: Como forma de revisar todo o conteúdo explanado ao longo das aulas anteriores incluindo esta aula, assistimos a uma pequena animação intitulada como “física quântica: experimento da fenda dupla” disponível no seguinte endereço

<https://www.youtube.com/watch?v=GXAYW4a3OZY&list=PLJ33OI-BTtlq8IG6lZdVcD8cVklR80Ug-&index=2>

6º Aula: A atividade experimental da “borracha quântica”

Objetivo: Manusear o experimento e ilustrar os efeitos quânticos citados.

Procedimento didático: Como alicerce para a nossa sequência de ensino, nesta aula passaremos o nosso tempo explorando a atividade experimental. O professor terá como papel mediar os feitos dos alunos. Controlando-os, questionando-os e dando dicas dos passos a serem seguidos.

No primeiro momento fizemos a identificação do fenômeno de interferência, em seguida passamos para o identificador de caminho e por fim a aplicação da borracha quântica e então a verificação da mesma no sentido de apagar eventos anteriores, sempre fazendo ligação aos princípios que regem a física quântica.

O intuito dessa forma de moldagem concentra-se em ter um aproveitamento satisfatório e uma administração do próprio tempo de aula.

7º Aula: 2º Avaliação diagnóstica

Objetivo: Avaliar o conhecimento adquirido após a aplicação da sequência de ensino e da atividade experimental.

Procedimento didático: A aplicação da 2º avaliação diagnóstica consiste em reaplicar a mesma avaliação inicial. O intuito desta avaliação é verificar se após a apresentação da sequência de ensino o aluno compreendeu o que seriam os conceitos básicos que regem a física quântica, além de mostrar uma opção para se ensinar a física quântica.

Após a realização desta atividade avaliativa, finalizamos nossa sequência de ensino, agradecendo a participação e a atenção dos alunos. As avaliações diagnósticas devem ser corrigidas procurando analisar os erros, as dúvidas e verificando se houve aprendizagem por parte dos alunos.

Terminado o planejamento da nossa sequência de ensino da física quântica, nós a aplicamos em uma escola da rede estadual de ensino. A aplicação da nossa sequência de ensino será melhor abordada no próximo capítulo.

4. APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA NO ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA PARA O ENSINO MÉDIO

A nossa proposta de ensino foi realizada no segundo semestre do ano de 2019 em uma escola da rede pública de ensino, durante as aulas da disciplina de física. Tivemos a participação de alguns alunos do terceiro ano do ensino médio.

As nossas necessidades para que pudéssemos ter um melhor aproveitamento seria uma sala de aula com Datashow, o mais escura possível e tempo. Nós tínhamos pouco tempo para conseguir aplicar a nossa sequência didática, pois como o assunto, em geral, é o último assunto do ensino médio então havíamos pouco tempo para conseguirmos finalizá-lo, além de que a direção da escola havia nos disponibilizado apenas dois dias para a execução desta atividade. O maior motivo encontrava-se no fato de estar finalizando o ano letivo.

Nossas atividades didáticas foram realizadas em uma sala de aula que obedecia ao critério de ser escura e que possuísse Datashow. Tendo uma carga horária de 45 minutos por aula, durante dois dias. Ou seja, foram dois dias de aplicação de atividade, onde no primeiro dia os alunos tiveram quatro tempos de aula e no segundo os outros três restantes.

Tomamos como opção trabalhar com alunos que além de possuírem os requisitos básicos, que também estivessem dispostos a passar dois dias estudando física quântica. Esta decisão foi necessária pois possuíamos de apenas material para confeccionar apenas uma atividade experimental. E então conseguimos formar uma única turma com 20 alunos. Todos alunos estavam na faixa etária ente 17 e 18 anos de idade e todos participaram de todos passos (aulas)

A sequência de ensino iniciou-se com a apresentação do que iríamos trabalhar e como iríamos realizar as nossas atividades, em seguida realizamos a aplicação da nossa primeira aula, a 1º avaliação diagnóstica, onde os alunos tiveram um tempo de 45 minutos para a realização desta atividade de verificação.

A avaliação consta de 7 questões extraídas de alguns certames ocorridos no Brasil, mas que todas tinham ligação com o conteúdo estudado.

Ao finalizarem a avaliação iniciamos a aplicação da nossa segunda aula, que consiste em estudarmos a luz e a radiação eletromagnética. Procuramos fazer um apanhado entre algumas características da luz e em que alguns povos acreditavam que ela seria, como:

- A diferença entre a luz e a escuridão;
- O surgimento do fogo;
- A importância da luz para a vida na Terra;
- A visão atomística para os filósofos gregos da antiguidade: simulacros ou eidola (teoria sobre a visão do filósofo Leucipo de Mileto);
- Os raios de luz da escola pitagórica: quid;
- A ideia de luz do pensamento de filósofos árabes: A ideia que se tem hoje;
- O embate entre Isaac Newton e Huygens: Corpúsculos de luz (partícula) ou onda?

Neste momento, procuramos dar ênfase a esse embate necessário entre Newton e Huygens e com o intuito de lembrarmos a ideia da interferência, fenômeno ondulatório que Huygens utilizou para confrontar Newton. Utilizamos de uma atividade experimental simples para verificação da interferência que necessita de:

1. Uma caixa de som a prova d'água e com bluetooth.
2. Uma tigela com água.

Ao pegarmos a tigela com água colocaríamos a caixa de som e via bluetooth deixaríamos tocar qualquer música. Com o intuito de obtermos o fenômeno de interferência como mostrado na figura 11.

Figura 11: Experimento de interferência



Fonte: Própria, 2019.

Após esta paralisação com o intuito de recordarmos, de forma breve, o fenômeno da interferência demos continuidade ao conceito atualmente aceito de luz voltando nosso olhar para as ondas eletromagnéticas, onde explanamos sobre:

- A luz é uma energia radiante que causa a sensação de visão.
- Energia radiante e ondas eletromagnéticas de Maxwell.
- O espectro visível da luz.
- A luz visível que encanta: O LASER, suas características e aplicações.

Finalizado este momento de explicação, apresentei um modelo de laser, o laser pointer. Os alunos já sabiam o que é o laser, mas o laser pointer foi algo que deixei que eles manuseassem para que então observassem as características citadas na nossa aula. Lembrando-os de que ele seria um dos objetos a serem utilizados na nossa atividade experimental final.

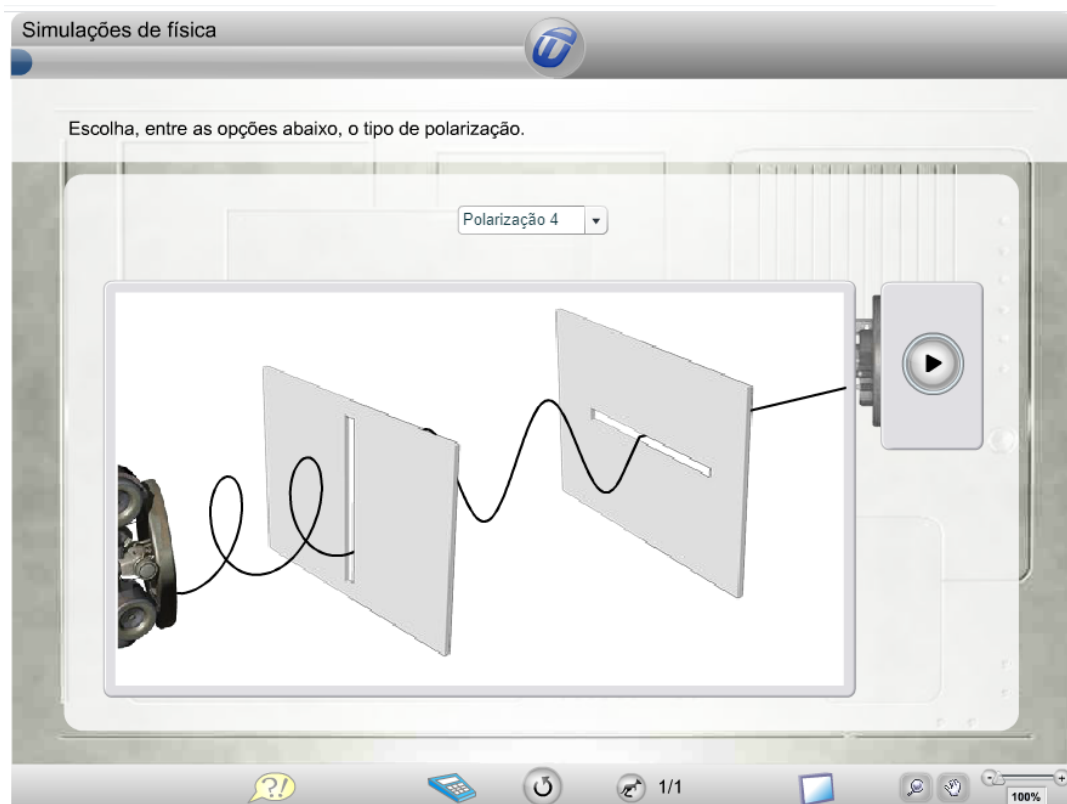
A aplicação da terceira aula é voltada a polarização da luz, onde dividimos a explanação em etapas, partindo da definição de polarização, o que

seria a polarização da luz e onde encontraríamos filmes polarizadores. Para isso, temos que a explicação ficou dividida em:

- Revisão de onda mecânica: onda longitudinal e transversal.
- Polarização de uma onda: uma característica de onda transversal.
- Polarização da luz.
- Aplicações: o polaroide, cinema em 3D e as abelhas

Para melhor ilustrar a polarização de uma onda, utilizamos de uma animação com de polarização aplicada a uma corda, está animação encontra-se no site www.educandus.com.br. É um site de domínio público onde encontramos diversas ferramentas das variadas áreas do conhecimento da educação básica. Escolhemos a opção da animação que retrata a polarização em uma corda, conforme a figura a seguir.

Imagem 4: Polarização em uma corda.



Fonte: Simulador Educandus, 2019.

O ideal neste primeiro momento seria explicar a questão do que seria a definição para palavra polarizador, porém procuraremos fazer o uso prático em uma ferramenta voltada a física, para então darmos segmento ao que seria a polarização da luz. Onde damos ênfase ao modelo ondulatório da luz aceito até hoje, a proposta de que ela seja uma onda eletromagnética, onde campos elétricos e magnéticos são perpendiculares entre si. Revisamos de forma rápida a ideia de onda eletromagnética, uma vez que este seria um conteúdo de pré-requisito.

E por fim, procuramos então demonstrar onde encontraríamos os polarizadores da luz no nosso cotidiano, para isso fizemos uso de exemplos: os óculos e o efeito tridimensional formado pelas lentes, justificando a sensação de visão tridimensional em um plano bidimensional; As abelhas, dando ênfase na vantagem que elas tiram proveito para localizar a sua colmeia, tendo como referência principalmente as radiações ultravioletas, espalhadas na atmosfera, parcialmente polarizadas; e o polaroide, que é um tipo de plástico que possui o filme polarizador encontrado em diversos produtos como óculos de sol, microscópios, tela em LCD.

O último objeto (tela em LCD) foi o que mais comentamos e para entender melhor a função de um filme polarizador assistimos a um vídeo de domínio público intitulado como “COMO IDENTIFICAR A PELICULA POLARIZADA CORRETA” que se encontra no link <https://www.youtube.com/watch?v=42VYx4E21mk&t=2s>.

E após assistirmos ao vídeo e então entendermos como devem ser usados os polarizadores, começamos a extração da película polarizadora de uma tela de monitor em LCD (que não funcionava mais), como mostramos na figura... Fizemos os testes com o laser e então verificamos a diferença de uma luz ao passar pelo filme polarizador na horizontal e na vertical, mas antes identificamos qual lado seria o horizontal e qual seria o vertical, para não confundirmos posteriormente, conforme mostrados nas figuras a seguir, obtivemos as seguintes imagens:

Figura 12: Filme polarizador direcionado na vertical.



Fonte: Própria, 2019.

Figura 13: Filme polarizador direcionado na horizontal.



Fonte: Própria, 2019

Onde nesta primeira observação tivemos que além de constatar a diferença entre as imagens formadas, também conseguimos visualizar a questão da luminosidade. Tivemos uma maior luminosidade na imagem formada pelo filme polarizador direcionado na horizontal, que por sinal era a direção que estava posta na tela LCD. Nesta próxima figura... temos os alunos verificando a diferença dos polarizadores.

Figura 14: Alunos manuseando o filme polarizador



Fonte: Própria, 2019.

Fizemos uso do que seria a nossa borracha quântica, porém, ela só passará a ser a borracha quando posta com os outros itens. Nesta aula ela é apenas um filme polarizador em um suporte de isopor. E assim finalizamos esta terceira aula.

A nossa quarta aula e a última do primeiro dia de aplicação da nossa sequência de ensino, serviu para olharmos mais para o que realmente seria o nosso objetivo. Após aprendermos um pouco sobre alguns instrumentos que utilizaríamos na nossa atividade experimental, voltamos a nossa atenção para o momento em que surge os ideais que vem dar início a física quântica. Utilizamos da história da ciência para explicarmos o momento em que iríamos estudar. Nesta aula dividimos as nossas explicações da seguinte forma:

- A completude da física e a conferência da Royal Society em março de 1900
- “Duas nuvenzinhas e as suas tempestades”
- Física quântica: o corpo negro, a teoria dos quanta, o efeito fotoelétrico, a natureza da luz, dualidade onda-partícula e os princípios da física quântica.

Nesta aula, levantamos curiosidades históricas apoiados em comentários e biografias de algumas literaturas com o intuito de alcançarmos os objetivos do nosso trabalho e através desta aula explanarmos alguns conceitos necessários para uma possível compreensão sobre os princípios da física quântica. Aproveitamos também este momento para um pequeno momento de perguntas e respostas.

O tempo nesta aula não foi nosso amigo, mesmo tendo sido planejada e levando-se em consideração um pequeno espaço para as possíveis perguntas que iriam acontecer e que aconteceram. Não tivemos como responder a todos os questionamentos.

Mas, como planejado também, esta foi a nossa última aula do dia. Os alunos teriam tempo para pensar e processar o que haviam aprendido e possivelmente levantar novos questionamentos no dia posterior.

No dia seguinte, iniciamos a próxima etapa, a etapa da atividade experimental, onde alguns dos questionamentos iriam ser respondidos, seja na aula ou na execução da atividade experimental que faria alusão aos efeitos quânticos. E então antes mesmo de iniciar a nossa quinta aula, os alunos estavam cheios de perguntas para fazerem e com esperança de que tivessem

respostas. Tive que pedir um pouco de calma, que deveríamos iniciar a nossa aula e então, possivelmente, algumas das suas perguntas iriam ser respondidas.

Iniciamos a nossa quinta aula, procurando focar na dualidade onda-partícula, a hipótese de Louis de Broglie. Explanar a definição da dualidade foi tão complicada de aceitar na época em que ela foi proposta quanto em sala de aula. Para isso tivemos que utilizar de alguns artifícios/caminhos para chegarmos então a compreensão de algumas definições, principalmente com relação aos princípios que regem a física quântica. Para isso escolhemos seguir como eixo norteador a seguinte sequência:

- Introdução: Fatos históricos
- Experimento da dupla fenda
- Dualidade onda-partícula: A hipótese de De Broglie, princípio da complementariedade e o princípio da incerteza
- Exercícios

Trouxemos novamente os fatos históricos com o intuito de recordarmos o que havíamos estudado recentemente. Onde exploramos a mecânica newtoniana, a teoria eletromagnética de Maxwell, a termodinâmica de Boltzmann e para somar com estes grandes comentamos também os sofisticados e elegantes tratamento matemático de Lagrange e Hamilton, fincando assim os conceitos da física clássica. Continuamos com o estabelecimento da física moderna no início do século XX, com os trabalhos de Einstein e Max Planck.

Refizemos através de uma simulação computacional do PHET, o mesmo simulador que se encontra na imagem 1: interferência de ondas sonoras, no capítulo 2, o experimento da fenda dupla para ondas sonoras e mecânicas. Finalizado este momento fizemos alguns questionamentos como: Ao ser arremessada bolinhas de gude através de uma fenda, que imagem teríamos? E se arremessássemos estas bolinhas de gude por duas fendas, que resultado teríamos? E se no lugar dessas partículas, tivéssemos elétrons?

E assim, passamos a explicar o motivo pelo qual apareceu o mesmo padrão de interferência da água que observamos na figura e o mesmo padrão de interferência do simulado PHET, a indignação dos cientistas com o resultado e com o fato de não conseguir uma exata resposta com o ocorrido.

Passamos então ao um outro questionamento: o elétron é onda ou partícula? Esta pergunta é de extrema necessidade para então justificarmos a dualidade onda-partícula. Neste momento da aula, após toda a explanação com o intuito de termos uma melhor fixação de todas as informações recebidas, assistimos a um vídeo, intitulado “física quântica: experimento da fenda dupla”.

Após assistirmos ao vídeo, continuamos com a explanação da sugestão de De Broglie sobre o comportamento dual onda-partícula, a relação entre o módulo do momento linear da partícula e o comprimento de onda λ associado ao comportamento ondulatório e finalizamos com alguns comentários onde, a hipótese de De Broglie, é estranha por contrariar o senso comum do nosso mundo macroscópico, porém, no nível atômico, o comportamento da matéria tem se mostrado bastante estranho.

E estas estranhezas se devem a alguns comportamentos e procurando dar um eixo norteador para os estudos a mecânica foi que comentamos o que seria o princípio da complementariedade de Bohr, onde o caráter de uma entidade física é complementar e não pode ser exibido ao mesmo tempo. E comentamos o princípio da incerteza.

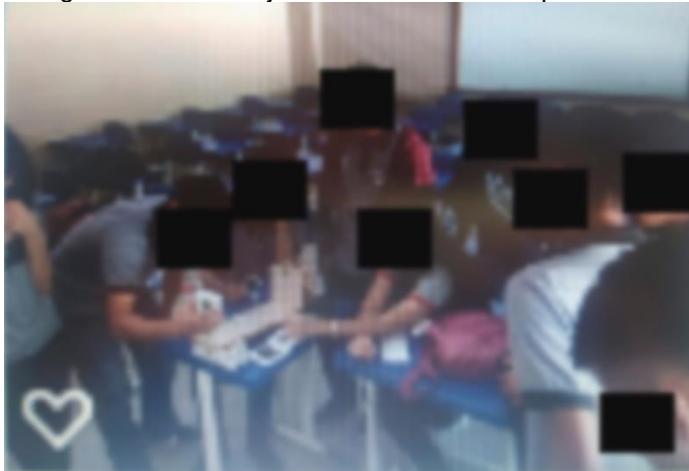
Ao finalizarmos este primeiro momento que seria a nossa quinta aula, as dúvidas começavam a diminuir, porém sem muito entender o que seriam estas questões da dualidade onda-partícula e o que realmente significavam os dois princípios levantados da física quântica.

É neste momento, que durante o decorrer das nossas aulas anteriores e depois de conhecermos alguns utensílios e prepararmos a nossa atividade experimental. Chegamos ao momento de colocar o nosso aparato para funcionamento. Onde pela última vez, explicamos que o que iríamos ver não seria o fenômeno quântico em si, mas que desenvolvemos uma atividade experimental que tem como objetivo ilustrar alguns efeitos quânticos. Foi então que iniciamos a nossa sexta aula.

A utilização do nosso aparato desenvolvido para a nossa sequência de ensino trouxe bastante entusiasmo, e logo com a mediação do professor, os alunos começaram a fazer os ajustes necessários, conforme veremos na

figura..., uma vez que já havíamos inicialmente visto parte da atividade sendo executada na diferenciação da direção do polarizador conforme mostrado na figura 15.

Figura 15: Alunos ajustando a atividade experimental



Fonte: Própria, 2019.

Ao ser finalizado os ajustes no nosso aparato experimental, chegamos ao momento de visualizarmos a ilustração de alguns efeitos quânticos que foram mencionados no texto. Através de algumas indagações dadas do professor, os alunos foram conduzidos a visualizar tais efeitos. Os questionamentos foram feitos, os alunos responderam e iremos expor algumas respostas dadas pelo alunos, mas com o intuito de preservarmos a identidade do alunos, identificaremos as respostas apenas por R1, R2 e R3. E ao final de cada questionamento, procuramos responder utilizando a nossa atividade experimental.

Professor: O que acontece se posicionarmos o laser na direção na direção do fio fino?

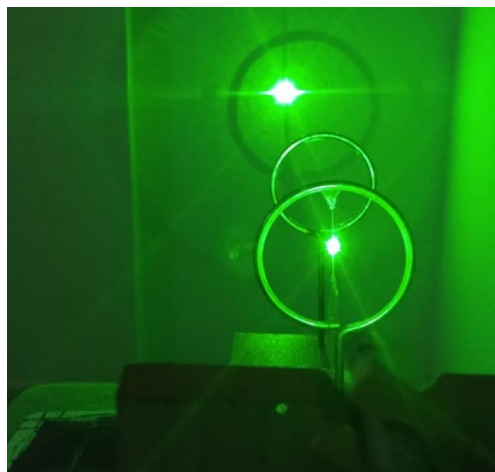
R1: O Laser vai se dividir.

R2: O laser vai ultrapassar o fio fino.

R3: O laser vai cortar o fio fino.

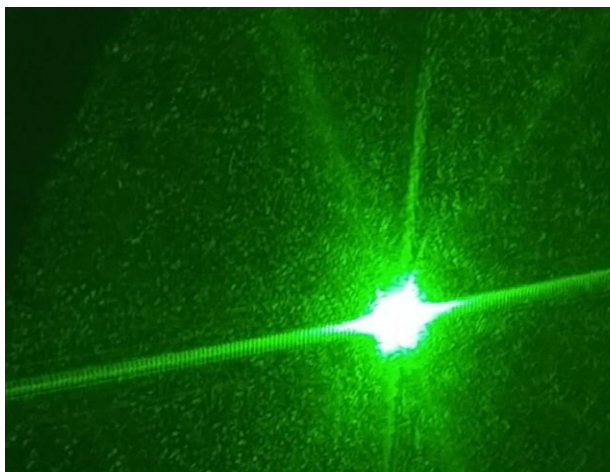
Respondemos com o seguinte efeito, o padrão de interferência, onde ao ser passada pelo fio fino, a luz que passa pelo lado direito interfere na luz que passa pelo lado esquerdo, conforme ilustrado na figura a seguir.

Figura 16: Atividade experimental montada com o fio no caminho do laser.



Fonte: Própria, 2019.

Figura 17: Franjas de interferência geradas pelo fio.



Fonte: Própria, 2019.

Quando a luz chega ao anteparo, que no nosso caso é a parede, acaba acontecendo algo semelhante a superposição que neste caso seria a superposição dos fótons, onde ele vem de cada um dos lados ou regiões, mas não sabemos visualizar ou até mesmo determinar de onde ele veio, se foi do filme polarizador da direita ou da esquerda, porém temos a visualização que assim como uma onda, os fótons interferiram. Procurando olhar pelo lado da física quântica, o que temos aqui é uma incerteza, ou seja, cada fóton deve ter passado pelos dois lados do fio fino, ao mesmo tempo e o caminho quando combinado cria esse efeito de interferência, ou seja, o padrão de interferência é criado através do diferente caminho escolhido pelo fóton.

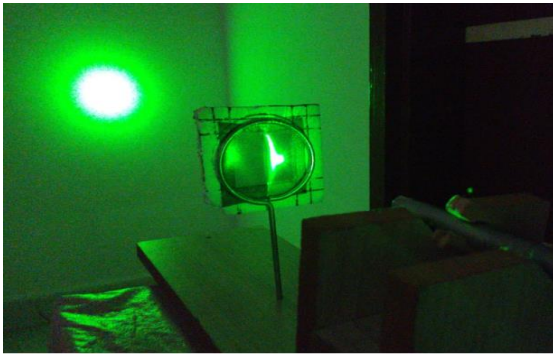
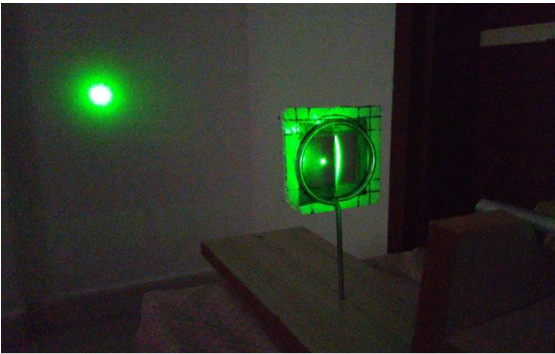
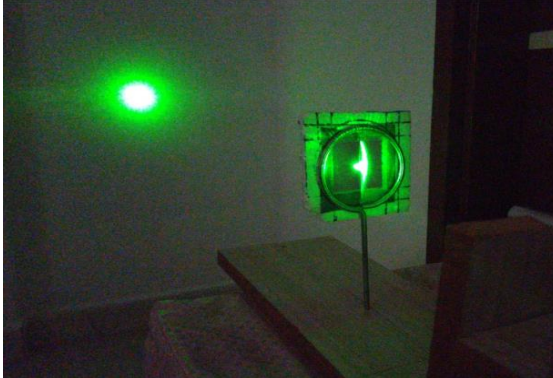
Professor: Quando mechemos nos filmes polarizadores, verificamos que houve uma diferença nas imagens formadas, uma ficou mais cheia e mais clara e a outra já era menor e menos nítida. E se agora colocarmos uma ao lado da outra, com o fio fino bem no meio das duas? Ou seja, qual a imagem iria ser formada pelo identificador de caminho?

R1: Interferência de novo.

R2: Sim professor, interferência por que os fótons irão passar de cada lado e por cada filme polarizador, depois eles se encontram e forma a interferência.

R3: Não faz sentido porque antes não tinha obstáculo e agora tem. Mas também não sei o que vai acontecer.

Partimos então para a nossa atividade experimental, mas antes de irmos direto ao ponto, retornamos a questão da diferença dos polarizadores quanto a direção horizontal e vertical, porém utilizando o nosso identificador de caminho e obtivemos as seguintes imagens:

Figura 18: Polarizador selecionando os fótons que passaram pelo lado direito. Direção: Horizontal.  Fonte: Própria, 2019	Figura 19: Polarizador selecionando os fótons que passaram pelo lado esquerdo. Direção: Vertical.  Fonte: Própria, 2019.
Figura 20: Identificador de caminho em ação  Fonte: Própria, 2019.	Figura 21: Imagem formada pelo identificador de caminho.  Fonte: Própria, 2019.

A imagem obtida pelo identificador de caminhos foi que a interferência anteriormente formada havia desaparecido, suas franjas foram destruídas, mas o formato da linha que havia formado pela interferência ainda estava presente conforme a figura 21. Foi explicado também que esse desaparecimento das franjas de interferência foi necessário, pois assim conseguiremos identificar por qual lado o fóton passou. Os fótons que passaram pelo lado direito foram

polarizados horizontalmente e os fótons que passaram pelo lado esquerdo ficaram polarizados verticalmente.

Finalizado este momento de verificação dos efeitos tanto de interferência quanto do identificador de caminho, passaremos a visualizar o que seriam os efeitos causados pela “borracha quântica”. Se a nossa atividade experimental leva este nome de borracha, então voltamos a pergunta que fizemos no capítulo anterior. O que ela apaga? Esse foi o próximo questionamento feito aos alunos, mas para isso preparamos a nossa atividade experimental. Logo após o identificador de caminhos, colocamos a “borracha quântica”. Conforme mostramos na imagem a seguir, ela montada.

Figura 22: “Borracha quântica” em ação



Fonte: Própria, 2019.

Professor: Senhores, chegou o momento de verificarmos a “borracha quântica” em ação. Como havíamos comentado anteriormente, na montagem dos suportes com os filmes polarizadores, teremos três borrachas. Uma na direção vertical, virando esta mesma borracha em 90° teremos também na direção horizontal e uma terceira que será um filme polarizador em 45°. Na opinião de vocês e pelo o que já viram, o que a nossa “borracha quântica” vai apagar?

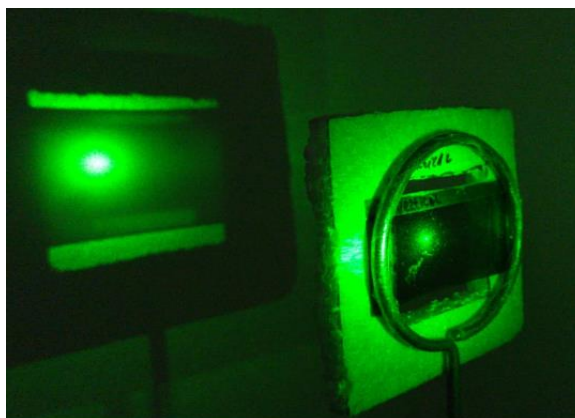
R1: Vai apagar tudo!

R2: Não sei professor, quero esperar pra ver.

R3: Não faço a mínima ideia.

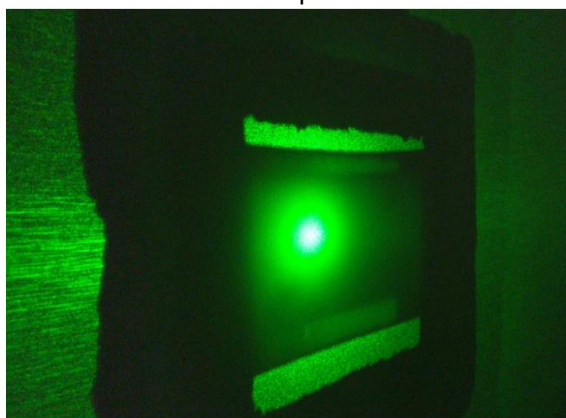
Para responder a este questionamento, utilizamos a nossa “borracha quântica” na seguinte ordem: vertical e horizontal. Fizemos uma pausa para explicar o que estávamos observando e então passamos para a nossa última “borracha quântica”, a de 45° . Então primeiramente mostramos o efeito e depois explicamos o que estava acontecendo. Os efeitos que conseguimos foram os mostrados nas figuras a seguir.

Figura 23: “Borracha quântica” na vertical.



Fonte: Própria, 2019.

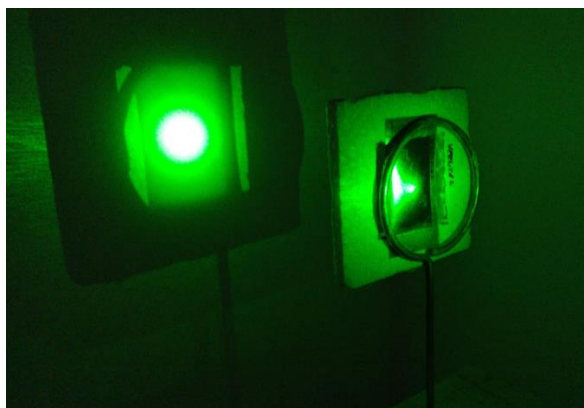
Figura 24: Imagem formada na vertical da “borracha quântica”



Fonte: Própria, 2019.

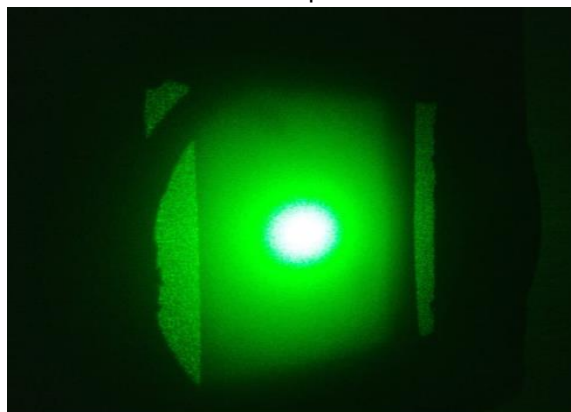
Na nossa primeira visualização, na vertical, já foi possível verificarmos uma diferença comparada as imagens adquiridas no identificador de caminho. Com a nossa borracha quântica podemos ver que além de estar selecionando o ftons que passam na vertical, também constatamos que ao redor da imagem formada esta mais limpo. E que os resquícios deixados pela interferencia, a linha que a interefencia havia formada, neste momento desapareceu por completo. Em seguida viramos perpendicularmente a nossa borracha, para então visualizarmos o efeito causado na direção horizontal e então obtivemos o seguinte resultado.

Figura 25 : “Borracha quântica” na horizontal.



Fonte: Própria, 2019.

Figura 26: Imagem formada na horizontal da “borracha quântica”

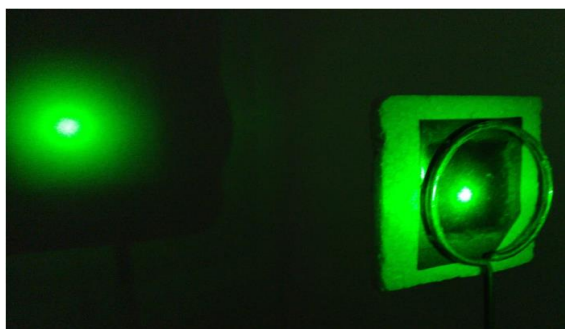


Fonte: Própria, 2019.

Posicionada horizontalmente a nossa borracha quântica, verificamos que também ela passa a selecionar os fótons que passam na horizontal, verificamos também que esta é mais limpa e uma outra diferença comparada à imagem anterior temos o tamanho, nesta direção a imagem é bem maior.

Após a realização destes dois efeitos, explicamos que se somarmos as duas imagens, a vertical e a horizontal, teremos uma imagem totalmente sem interferência e limpa. Ou seja, o fato de deixar a imagem mais limpa significa que de fato estamos apagando algo, estamos apagando informações. Os fótons carregam informações que foram apagadas pelos polarizadores.

Passamos a nossa última “borracha quântica”, posicionado com um ângulo de 45° . Nesta última fase da nossa atividade experimental, tivemos uma grande dificuldade devido não utilizarmos um laser de alta qualidade, porém obtivemos a seguinte imagem.

Figura 27: “Borracha quântica” em 45° .

Fonte: Própria, 2019.

Figura 28: Imagem formada em 45° da “borracha quântica”

Fonte: Própria, 2019.

Note que tivemos a formação de uma imagem diferente das anteriores, pois em quanto houve uma destruição da interferência, nesta imagem houve uma possível ideia de reconstrução da linha da interferência. Nesta linha de interferência, podemos ver claramente quando estávamos apenas com o fio fino e também ainda pudemos ver quando estava o identificador de caminhos.

No decorrer desta aula, comentamos a ideia de superposição, o princípio da incerteza e logo no início o princípio da complementariedade. E também no que a “borracha quântica” atua, ou seja, focamos no ato da mesma apagar possíveis informações, e que por mais que tentamos recuperar estas informações não será possível devido os acontecimentos de eventos anteriores. Finalizando este momento, lembrando que o que tivemos a oportunidade de ver, não é um evento quântico e sim algo que nos faz ter uma ideia do que seria alguns dos efeitos e comportamento quânticos. Em seguida, passamos para a nossa última aula.

A sétima parte ou sétima aula que consiste na aplicação da avaliação diagnóstica 2. Iniciamos esta última etapa agradecendo a participação dos alunos durante a execução da nossa atividade experimental, agradecendo também ao empenho e a própria força de vontade. Explicamos que daremos início a uma avaliação com o intuito de termos um comparativo do aprendizado destes alunos ao passar por todas as seis aulas anteriores. Esta avaliação possui sete questões, as mesmas questões que aplicamos na primeira avaliação e vale ressaltar a confiança com que os alunos estavam ao responder esta segunda avaliação, e a procura das lembranças de informações recebidas no decorrer das aulas.

As análises, respostas e algumas outras informações sobre a nossa sequência de ensino serão levantadas no próximo capítulo.

5. ANÁLISE E DISCUSSÕES

Apresentaremos as nossas análises, que será uma análise quantitativa, das avaliações diagnósticas tanto inicial quanto final, fazendo um comparativo entre cada questionamento (questões da avaliação). A avaliação que foi utilizada encontra-se no apêndice A. Em cada pergunta faremos uma análise de acertos e erros, antes da aplicação da sequência de ensino e após a sequência de ensino, ou seja, nossas análises dos dados obtidos iram concentrar-se na primeira e na sétima aula da nossa proposta de ensino. No final faremos um levantamento médio de aprendizado de toda a nossa proposta.

O nosso primeiro questionamento pede para que façamos uma listagem correta entre situações físicas e as grandes áreas das teorias físicas.

Figura 29: 1º questão da avaliação diagnóstica

1. Na coluna da esquerda, estão listados eventos ou situações físicas; na da direita, grandes áreas das teorias físicas.

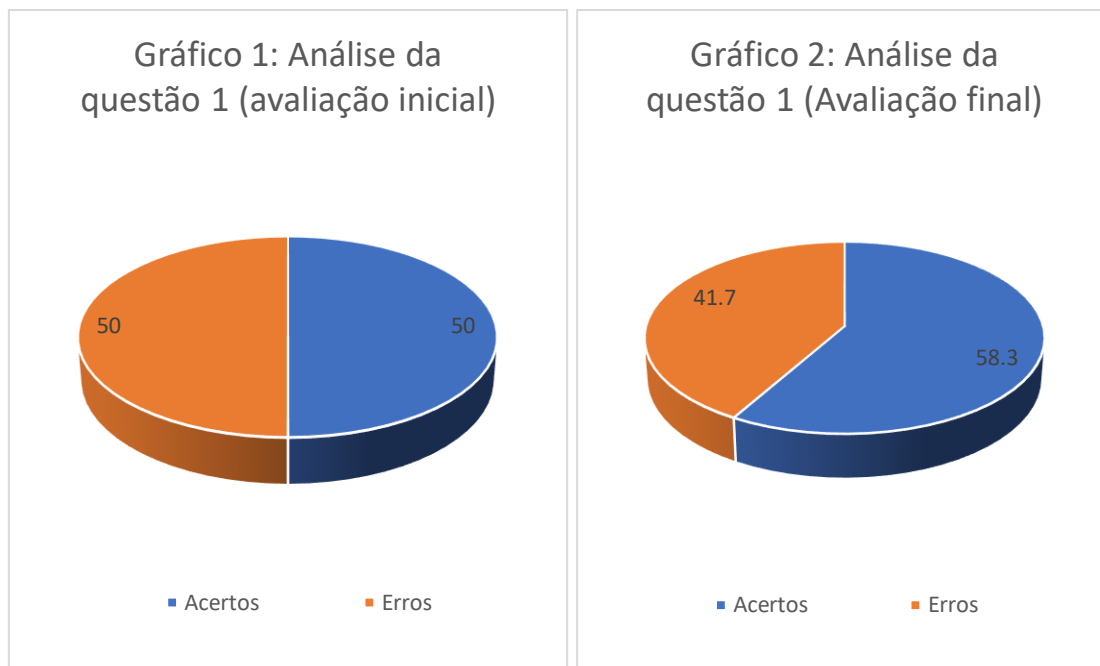
1. Descrição de sistemas que envolvam objetos que se movam com velocidades próximas da velocidade da luz.	(a) Física Clássica
2. Descrição de fenômenos que ocorrem em dimensões muito pequenas, como as de um átomo.	(b) Física Quântica
3. Unificação da Eletricidade e Magnetismo, conforme realizada por Maxwell.	(c) Física Relativística

A alternativa que relaciona corretamente o evento ou situação com a área usada para descrevê-lo é

- a) 1(a), 2(b) e 3(c).
- b) 1(a), 2(c) e 3(b).
- c) 1(b), 2(c) e 3(a).
- d) 1(c), 2(a) e 3(b).
- e) 1(c), 2(b) e 3(a)

Fonte: Ufrgs, 2019.

Nesta primeira questão a resposta a ser assinalada de forma correta será a alternativa de letra E. O objetivo desta primeira questão é saber se os alunos sabem diferenciar áreas da física e o que cada uma delas estudam. Para esta primeira questão, na avaliação diagnóstica 1, obtivemos um total de 50% de erros e 50% de acertos (gráfico 1), após a aplicação da sequência de ensino, na avaliação diagnóstica 2, obtivemos um total de 41,7% de erros e 58,3% de acertos (gráfico2).

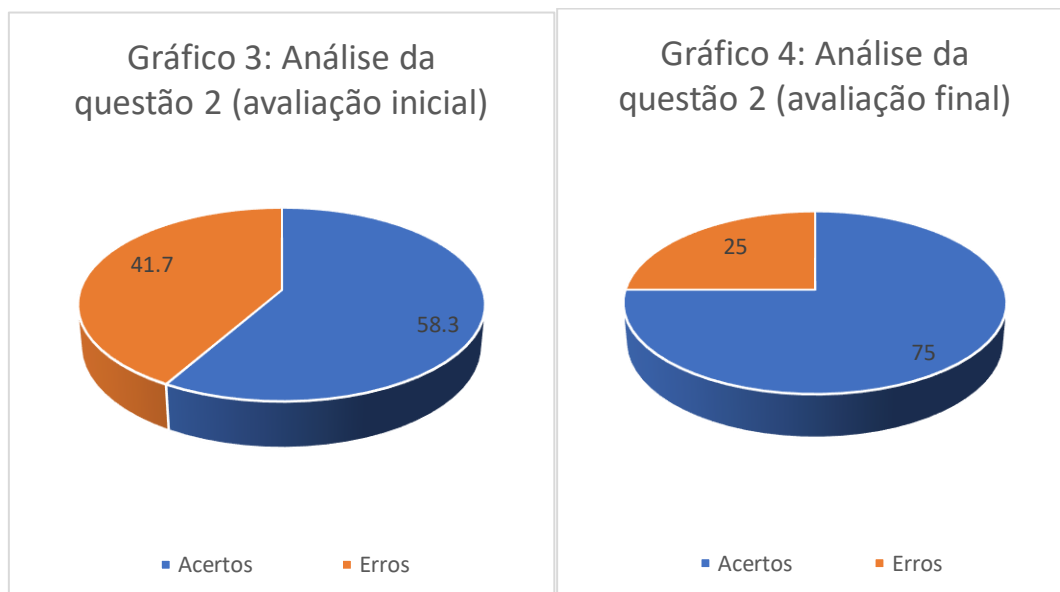


No nosso segundo questionamento, utilizamos um texto que faz menção ao momento histórico, de maneira resumida, sobre os dois problemas da física que segundo Lorde Kelvin, faltariam a serem resolvidos, ou seja, uma menção ao surgimento da física moderna.

- Figura 30: 2ª questão da avaliação diagnóstica
2. No contexto histórico da virada do século XIX para o século XX, Lord Kelvin proferiu uma palestra e afirmou que não havia mais muitos pontos obscuros para serem resolvidos pela Física. Destacou que existiam apenas dois problemas: o primeiro referente a não detecção do vento de éter (resultado nulo do experimento de Michelson-Morley), e o segundo, relacionado à partição de energia (emissão e absorção da radiação de corpo negro). Em relação ao avanço na construção de conhecimento em Física, decorrente dos dois problemas apontados por Lord Kelvin, assinale a alternativa **correta**.
- Os pontos obscuros apontados por Lord Kelvin não se configuraram em problemas científicos, e foram ignorados pela Ciência.
 - Os problemas sinalizados por Lord Kelvin foram solucionados pela mecânica newtoniana, sendo necessário apenas um refinamento experimental.
 - A Ciência, em particular a Física, não avançou mediante a resolução de problemas e aos pontos obscuros apontados por Lord Kelvin, que retratavam apenas dúvidas pessoais dele próprio.
 - Max Planck foi o único a solucionar os dois problemas apontados por Lord Kelvin e, por isso, Planck é considerado por muitos o “Pai da Mecânica Quântica”.
 - Os pontos obscuros destacados por Lord Kelvin foram determinantes na condução de mudanças radicais na Física, culminando na construção das teorias quânticas e relativísticas.

Fonte: Udesc, 2016.

Nesta questão a resposta a ser assinalada como correta seria a alternativa de letra E. O objetivo desta questão consiste em avaliar se alunos conseguem analisar o momento em que se passou o nascimento da física moderna. Na avaliação diagnóstica 1 obtivemos 41,7% de erros e 58,3% acertos (gráfico 3), porém na avaliação diagnóstica obtivemos uma boa diferença entre os acertos e erros, em um total de 25% de erros e 75% de acertos (gráfico 4).



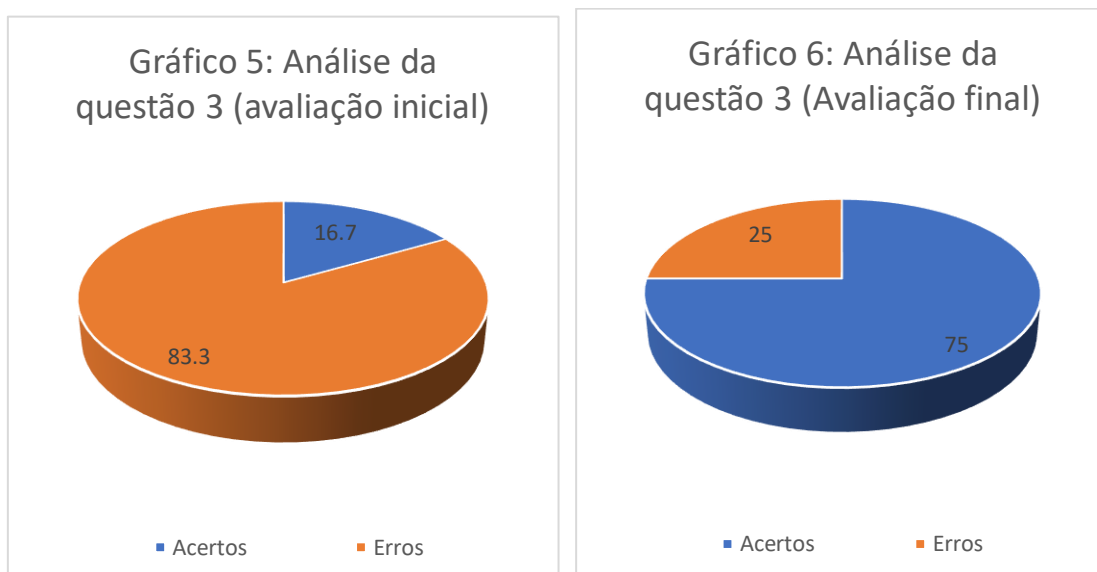
Na terceira questão, questionamos sobre a definição do princípio da incerteza de Heisenberg, com o objetivo de analisar o que eles sabiam sobre um dos princípios fundamentais da física quântica e o que eles conseguiram absorver depois da aplicação da nossa sequência de ensino.

Figura 31: 3ª questão da avaliação diagnóstica

- 3. O princípio da incerteza de Heisenberg trata da**
- incerteza do conhecimento da Física de que tudo é sempre relativo e nunca definitivo.**
 - imprecisão de definir as coordenadas de posição e o momento linear de uma partícula quântica simultaneamente, ao longo de uma direção.**
 - dificuldade de encontrar um elétron nas camadas de valência do átomo.**
 - dilatação do tempo e contração dos objetos ao atingirem velocidade próxima à da luz.**
 - variação de entropia e o sentido da seta do tempo.**

Fonte: Upe, 2015.

A resposta a ser assinalada na terceira questão seria a alternativa de letra B, onde se trata da imprecisão da definição de posição e o momento linear ao mesmo tempo. Uma razoável quantidade de alunos já tinha ouvido falar sobre o princípio da incerteza, porém não sabiam o que seria a sua definição. Na avaliação diagnóstica 1 tivemos um percentual de 83,3% de respostas erradas e apenas 16,7% de respostas acertadas (gráfico 5), porém após a aplicação da sequência didática este número teve uma expressiva alteração passando para 25% de questões erradas e 75% de acertos (gráfico 6). O que nos levou a pensar que tivemos uma boa quantidade de assimilação sobre o princípio da incerteza.



O nosso quarto questionamento, foi o mais interessante. Esta questão para resolvê-la teria que ser feito um pequeno cálculo, apenas a aplicação da relação entre o módulo do momento linear P da partícula e o comprimento de onda λ associado ao comportamento ondulatório. O objetivo concentrava-se em analisar se os alunos conseguiriam sair um pouco da teoria e partir um pouco para o cálculo e assim coletar dados sobre o seu conhecimento de notação científica.

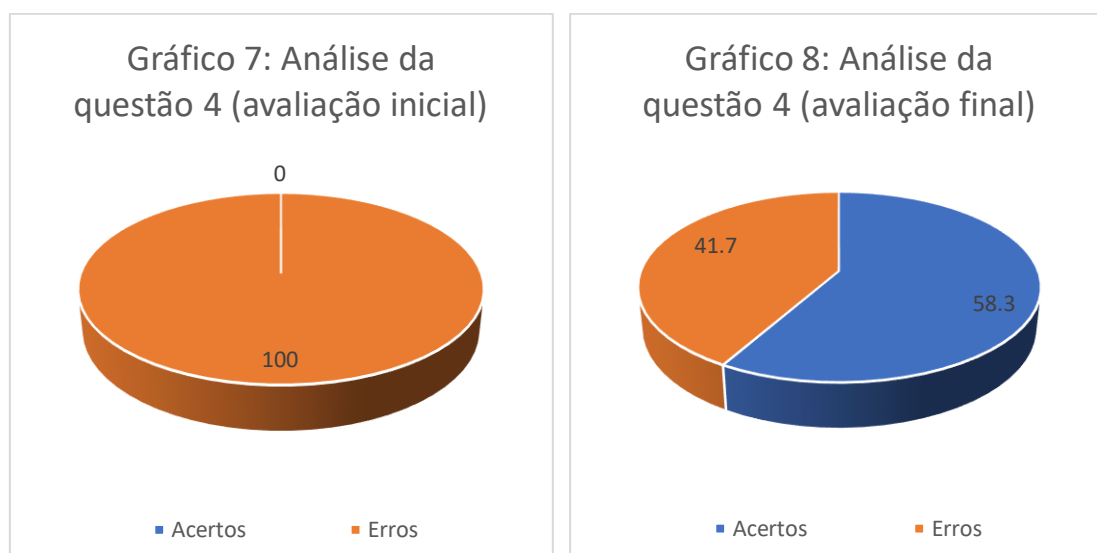
Figura 32: 4ª questão da avaliação diagnóstica

4. O físico francês Louis de Broglie (1892-1987), em analogia ao comportamento dual onda-partícula da luz, atribuiu propriedades ondulatórias à matéria. Sendo a constante de Planck $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, o comprimento de onda de Broglie para um elétron (massa $m = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$) com velocidade de módulo $v = 2,2 \times 10^6 \text{ m/s}$ aproximadamente,

a) $3,3 \times 10^{-10} \text{ m}$.
 b) $3,3 \times 10^{-9} \text{ m}$.
 c) $3,3 \times 10^3 \text{ m}$.
 d) $3,0 \times 10^9 \text{ m}$.
 e) $3,0 \times 10^{10} \text{ m}$.

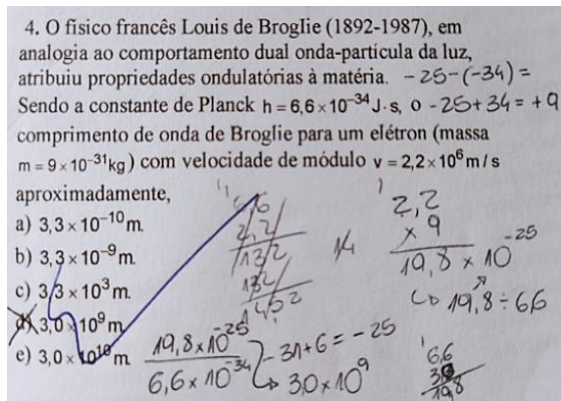
Fonte: Ufrgs, 2015.

Não tivemos bons resultados nesta questão, na primeira aplicação, o que já era esperado devido o fato dos alunos nunca terem estudado este conteúdo tivemos um total de 100% de erros e nenhum acerto (ver gráfico 7), onde em grande parte das avaliações não houve nenhuma tentativa. Porém, após aplicação da sequência de ensino, na avaliação diagnóstica 2, tivemos uma crescente no número de tentativas e destas tentativas tivemos um total de 41,7% de erros e 58,3% de acertos, ou seja, quase uma metade de acertos e erros (ver gráfico 8).



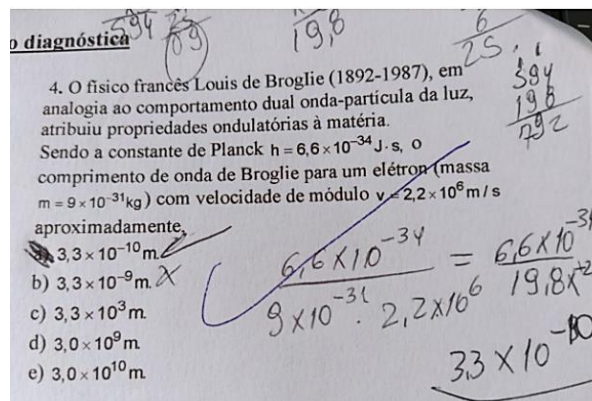
E para que pudéssemos observar o desenvolvimento de alguns alunos separamos duas questões, a figura 33, é referente a uma questão errada da avaliação diagnóstica 1 e a figura 34 é referente a uma questão acertada da avaliação diagnóstica 2.

Figura 33: 4ª questão da avaliação diagnóstica feita por um aluno antes da aplicação da sequência de ensino.



Fonte: Própria, 2019.

Figura 34: 4ª questão da avaliação diagnóstica feita por um aluno antes da aplicação da sequência de ensino.



Fonte: Própria, 2019.

Na quinta questão da nossa avaliação diagnóstica foi questionado o conhecimento que os alunos possuíam sobre o comportamento da luz na física quântica, pois já havíamos estudado a luz em óptica, ondulatória e no eletromagnetismo, mas e na física quântica? Qual seria o conhecimento prévio a respeito deste assunto.

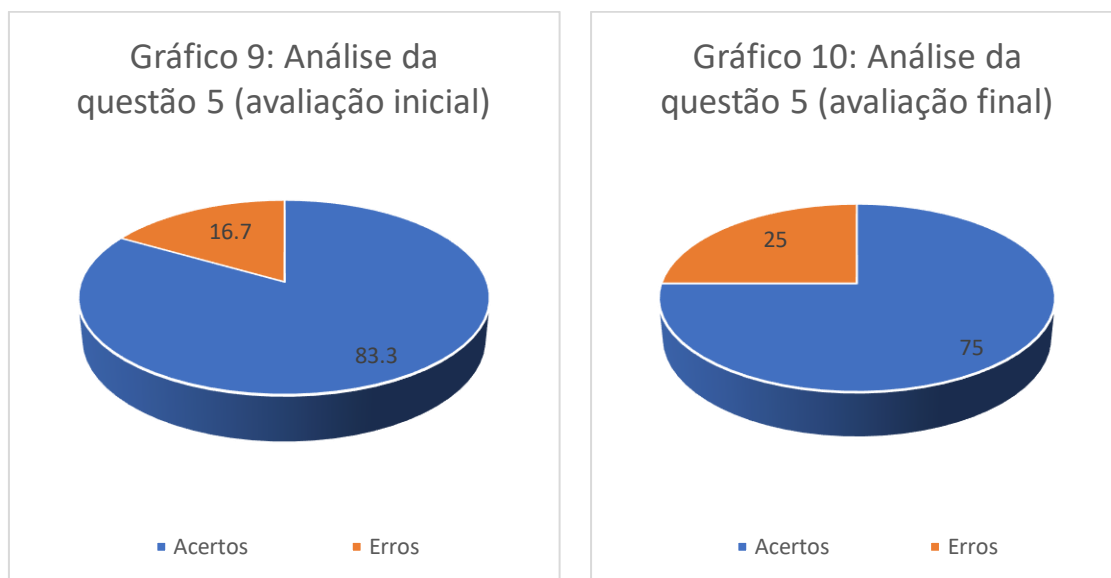
Figura 35: 5ª questão da avaliação diagnóstica

- 5) Na história da física, existem vários exemplos de conceitos que exigiram revisão ou mesmo substituição, quando novos dados experimentais se opuseram a eles. Em relação à natureza do comportamento da luz, isso não foi diferente, sendo resolvido somente no último século pela Mecânica Quântica. Qual é a natureza do comportamento da luz para a Mecânica Quântica?
- Natureza corpuscular.
 - Natureza ondulatória.
 - Natureza dual, ou seja, às vezes se comporta como onda e às vezes como partícula.
 - Natureza dual, ou seja, sempre se comporta como partícula.
 - Natureza dual, ou seja, sempre se comporta como onda.

Fonte: Própria, 2019.

Os resultados que obtivemos antes da aplicação da avaliação diagnóstica seria de 16,7% de erros e 83,3% de acertos (ver gráfico 9). Este resultado nos levou a concluir que os estudantes já tinham um conhecimento sobre como a luz se porta aos olhos da física quântica, porém a nossa surpresa acontece na segunda aplicação, os resultados após a aplicação da nossa sequência de ensino não foram favoráveis.

Com um total de 25% de erros e 75% de acertos, não atingimos um resultado satisfatório (ver gráfico 10). Não esperávamos uma diminuição. Houve uma redução com relação a compreensão do comportamento da luz. O que nos fez concluir uma certa confusão com relação ao conteúdo, logo uma correção nesta indagação seria necessária.



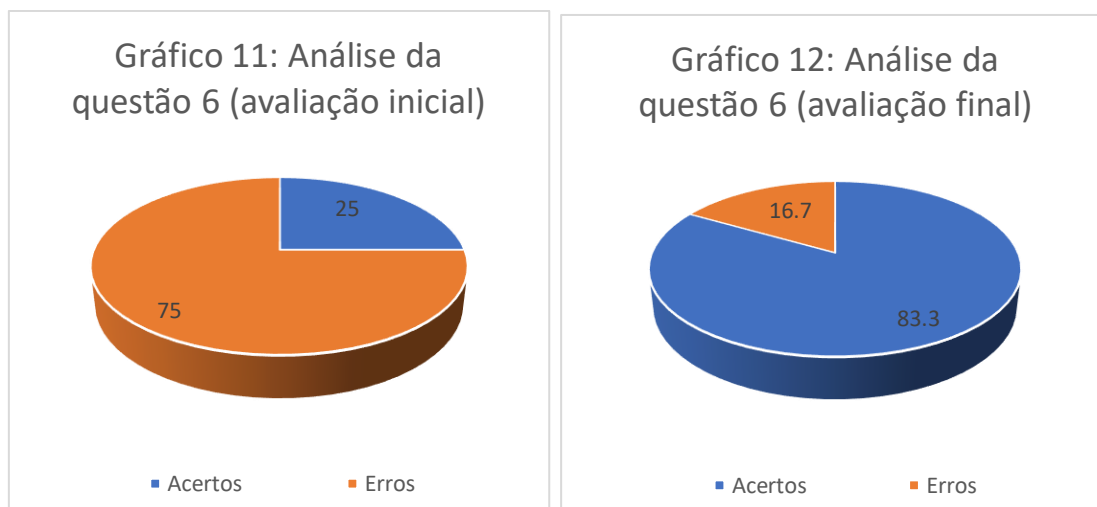
Mas, prosseguindo com o próximo questionamento que ressaltava sobre fenômenos que estariam relacionados ao dualismo onda-partícula. Neste questionamento o objetivo seria analisar a compreensão do dualismo assim como a percepção dos alunos com relação a fenômenos que poderia ser explicado por ele.

Figura 36: 6ª questão da avaliação diagnóstica

- 6) O dualismo onda-partícula refere-se a características corpusculares presentes nas ondas luminosas e as características ondulatórias presentes no comportamento de partículas, tais como elétrons. A natureza nos mostra que características corpusculares e ondulatórias não são antagônicas, mas sim complementares. Dentre os fenômenos listados, o único que não está relacionado com o dualismo onda-partícula é:
- o efeito fotoelétrico.
 - a ionização de átomos pela incidência de luz.
 - a difração de elétrons.
 - o rompimento de ligações entre átomos pela incidência de luz.
 - a propagação, no vácuo, de ondas de rádio de frequência média.

Fonte: Própria, 2019.

Neste questionamento tivemos um total, na avaliação diagnóstica 1, de 75% de questões erradas e apenas 25% de questões acertadas (ver gráfico 11). Este resultado se deu devido ao fato de alunos relatarem não saberem o que seria o termo dualismo, muito menos a fusão de onda-partícula, no sentido real do seu significado. Porém, na avaliação diagnóstica 2, obtivemos um total de 16,7% de erros e 83,3% de acertos (ver gráfico 12). Um resultado bastante satisfatório com relação a compreensão sobre um dos fenômenos e conceitos primordiais da física quântica.



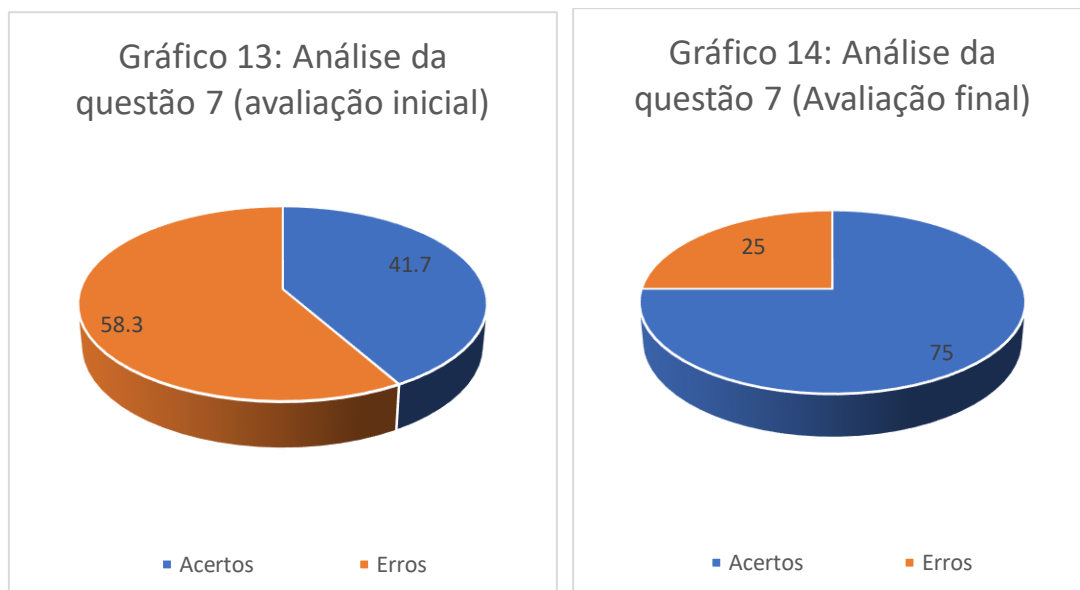
E por fim, o nosso último questionamento, a nossa sétima indagação que nos traz uma análise sobre o modelo atômico de Bohr, uma análise sobre a sua posição “exata”, mas que não é bem vista diante do olhar da física quântica, pois viola o princípio da incerteza.

Figura 37: 7ª questão da avaliação diagnóstica

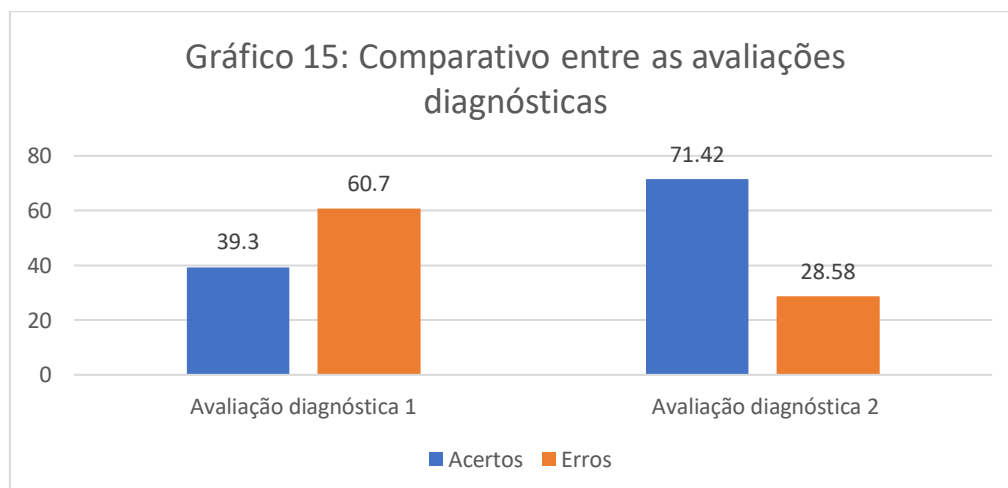
- 7) O modelo atômico de Bohr, aperfeiçoado por Sommerfeld, prevê órbitas elípticas para os elétrons em torno do núcleo num sistema planetário. A afirmação “um elétron encontra-se exatamente na posição de menor distância ao núcleo com velocidade exatamente igual a 10^7 m/s” é correta do ponto de vista do modelo de Bohr, mas viola o princípio:
- a) da relatividade restrita, de Einstein.
 - b) da conservação da energia.
 - c) de Pascal.
 - d) da incerteza de Heisenberg.
 - e) da conservação de momento linear.

Fonte: Própria, 2019.

Neste nosso último questionamento tivemos um percentual de 58,3% de questões erradas e um total de 41,7% de questões acertadas (ver gráfico 13). Este resultado foi da nossa avaliação prévia, quase um total de metade de acertos e erros. E em nossa avaliação final, tivemos uma boa alteração nos resultados onde 25% marcaram a alternativas incorretas e 75% dos alunos responderam de forma correta (ver gráfico 14). O que nos levou a crer em uma boa compreensão sobre o princípio da incerteza de Heisenberg.



Ao final da catalogação dos dados da avaliação diagnóstica 1 e da avaliação diagnóstica 2, ou seja, o antes e o depois da aplicação da nossa sequência de ensino, retiramos uma média entre os quantitativos de questões erradas e acertadas das duas avaliações e chegamos um valor médio das avaliações. Estes resultados foram postos no gráfico seguinte:



Onde tivemos um total de acertos na avaliação 1 de 39,3% de acertos e de questões erradas 60,7%. Comparando com a avaliação diagnóstica 2 tivemos um total de 71,42% de acertos e 28,58% de erros. Tivemos uma considerável mudança entre o conhecimento prévio e o conhecimento adquirido pelos alunos. O que nos leva a concluir que mesmo com o pouco tempo e com as muitas informações recebidas obtivemos um bom resultado.

No final da aplicação da avaliação diagnóstica 2 realizamos a correção da avaliação com o intuito de explanarmos alguns conceitos que pareceram ainda existir dúvidas e também focando principalmente no quarto questionamento que onde apareceu uma grande crescente com relação ao cálculo e o que aquele resultado significava.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao pensarmos em algo para ensinarmos a base da física quântica, independentemente do nível de ensino, encontramos dificuldades para encontrarmos algo que possa fazer tal demonstração. É complicado de visualizarmos devido a sua natureza de ação ser microscópica, logo a grande dificuldade seria em comentar algo que suprisse tal necessidade.

Em conjunto com esta dificuldade também temos a indústria cinematográfica que encontrou, através da ficção científica, motivos para explorar esta área de atuação da física, chamando a atenção para o que não é de fácil compreensão, principalmente levantamos aspectos que fogem do nosso cotidiano, algo que não faz sentido, ou que foge do nosso raio de ação humano.

Logo, decai sobre nós, professores de física, independentemente do nível de atuação, respondermos alguns desses questionamentos que alunos e curiosos nos trazem diariamente ou quase toda vez que assistem ou leem algo relativo à física quântica. Com o intuito de fazer com que as informações sobre como a física trata tais assuntos e olhar do que seria uma básica compreensão de conceitos relacionados a física quântica e o seu surgimento foi que procuramos trabalhar através de modelos de ensino, para procurar tornar a aula da física voltada a física quântica mais dinâmica e com o conhecimento significativo suficiente para além de explicitar a importância do estudo desta ciência.

Utilizamos de uma atividade experimental intitulada como “borracha quântica” no qual encontramos um forte alicerce para apoiar nossa sequência de ensino que tem como principal objetivo, através de conceitos explicarmos o que seria a base, através dos seus princípios, da física quântica. Disseminando também o quanto é importante conhecer algumas equações matemáticas, a compreender e aprender a conceituação, mostrando ao nosso público alvo, os estudantes e professores, que estudar física, em especial a física quântica, é importante e pode ser explorado de uma maneira menos monótona, procurando torna-la mais interessante levando em consideração o atual cenário que tende a uma crescente onda de curiosidade a respeito desta nova ciência.

A nossa sequência de ensino esteve em comunhão com animações computacionais de interferência do projeto PHET, com o intuito de observarmos o fenômeno de interferência, pois o uso animação computacional, que foi o tipo que utilizamos na nossa proposta, traz a perspectiva da visualização dos fenômenos abstratos, o que por sua vez aproxima o estudante a sua realidade, partindo do princípio que utilizamos uma máquina que está interligado ao seu dia-a-dia, o computador. E também de uma outra atividade experimental, também com o intuito de enxergarmos a interferência mas através das ondas mecânicas.

A tecnologia está presente na vida dos nossos estudantes, e fizemos desta ferramenta um aliado no ensino da ciência da física quântica, principalmente para visualizarmos imagens que não visualizaríamos com facilidade através de power point e apresentações que fizeram parte da nossa aplicação da sequência de ensino, assim como vídeos auxiliares para a explicitação de filmes polarizadores. A aprendizagem significativa de Ausubel por recepção significativa foi de extrema importância para tentarmos alcançar os nossos objetivos, pois foi onde encontramos o melhor apoio na aquisição dos conhecimentos novos que foram repassados através de um modelo de material de aprendizagem, a nossa atividade experimental, e nos conceitos que regem os princípios da física quântica, justamente porque procuramos tomar como norte a questão da aprendizagem por recepção significativa.

Por fim, esta proposta de ensino da física quântica teve como base a aprendizagem significativa de Ausubel através da recepção significativa por meio de conceitos alicerçados com um modelo de ensino, a atividade experimental “borracha quântica”, que por sua vez foi dividida em sete etapas. Que foram desde uma avaliação diagnóstica de conhecimento prévio, passeando por toda aplicação da sequência de ensino e confecção da atividade experimental, uma servindo de apoio a outra e finalizando com outra avaliação de conhecimento adquirido. Deixando assim, uma ideia de trabalhar a física quântica para alunos de nível médio, como forma de disseminar este conteúdo nas aulas de física.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTET, M. As pedagogias da Aprendizagem, Coleção Horizontes Pedagógicos. Editora do Instituto Piaget, Lisboa, 1997.

ALVARENGA, B. & MÁXIMO, A. Curso de Física. Vol.3. São Paulo: Spicione, 2000.

ASTOLFI, J.P. & DEVELAY, M. A didática das ciências. São Paulo: Papirus, 2001.

AUSUBEL, D.P. A aquisição e retenção de conhecimento: uma visão cognitiva. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.

AUSUBEL, D.P. Psicologia educacional: uma visão cognitiva. New York: Holt, Rinehart e Winston, 1968.

BEN-DOV, Y. Convite à física. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1996.

BLISS, J. & OGBORN, J. Tools for Exploratory Learning Programme – Technical Report 3: Semi-quantitative Reasoning - Exploratory (ESRC Information Technology In Education Initiative – End of Award Report). King's College London, Imperial College, Institute of Education – London, 1992.

Borges De Meneses, Ramiro D. A Complementaridade em N. Bohr: da física quântica à filosofia. Eikasia. Revista de Filosofia, ano III, 2008.

BRASIL, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. PCNs Ensino Médio: Parte I - Bases Legais. Brasília: MEC, SEMTEC, 2000.

BRASIL, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. PCNs Ensino Médio: Parte III - Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, SEMTEC, 2000.

BUNGE, M. Natureza dos objetos conceituais. In: Bunge, M. Epistemologia: Curso de atualização. (tradução Cláudio Navarra). P.39-50, São Paulo: EDUSP, 1980.

CARUSO, F. & OGURI, V. Física moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CASSINELLO, A. O mistério quântico: uma expedição às fronteiras da física. São Paulo: Planeta do Brasil, 2017.

COHEN, A. M. Mecânica quântica 1 e 2. Notas de aula. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 1996.

DE BROGLIE, L. Le dualisme des ondes et des corpuscules dans l'Euvres de Albert Einstein. Paris: Palais de L'Institut, 1955.

DELIZOICOV, D. & Angotti, J.A.P., Física. São Paulo. Cortez, 1992

FACCIPIERI JUNIOR, Jorge H. Construção de uma Borracha Quântica. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: . Acesso em 04 julho 2017.

GASPAR, A. FÍSICA. Vol.3. São Paulo: Ática, 2000.

HILLMER, R.; KWIAT, P. Faça você mesmo uma Borracha Quântica. Scientific American Brasil. Nº 61, P. 76-81, junho 2007.

HODSON, D. Is this really what scientists do? Seeking a more authentic science in and beyond the school laboratory. In: WELLINGTON, J. Practical Work in school science: which way now? London: Routledge, 1998.

JÚNIOR, F. R. & FERRARO, N. G. & SOARES, P. A. T. Os Fundamentos de Física. Vol. 3. São Paulo, Moderna, 2003

LOEDEL, E. Enseanza de la Física. Buenos Aires: Kapelusz, 1949

LORDE KELVIN, Phil. Mag. S.6. 2, Julho, 1901.

MOREIRA, M. A. & MASINI, E. F. S. Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel. 2.ed. São Paulo: Centauro, 2006.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica. Vol. 4. São Paulo: Blucher, 2014.

PARANÁ, D. J., FÍSICA. Vol.3. São Paulo: Ática, 1993.

PINHO ALVES, J. Atividades experimentais: do Método a Prática Construtivista. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

Planck, M., The theory of Heat Radiation. Edição utilizada, New York: Dover, 1995.

ROCHA, J.F.M.(Org.) et alii, Origens e evolução das Ideias da Física. Salvador: EDUFBA, 2002.

ROSITO, B. E. O Ensino de Ciências e a Experimentação. In: Construtivismo e Ensino de Ciências. MORAES, R. (organizador). Porto Alegre: EDIPUCRS, 195-208, 2000.

STEED, M. S., A Simulation Construction Kit: Cognitive Process and Educational Implications. Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching, 11, 39-52, 1992.

TIPLER, P. A. Física moderna. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014

TRINDADE, J. A. O. Os Obstáculos Epistemológicos e a Educação Matemática. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

WHITTAKER, E. A history of the theories of aether and electricity. Edição utilizada, s.l., Tomash & AIP, 1987.

ANEXO A – Produto educacional

An abstract illustration of quantum physics concepts. It features a central bright yellow and white point, from which numerous blue and white lines radiate outwards, forming a complex, web-like structure. This structure is overlaid with several concentric circles and arcs, suggesting orbits or wave functions. The background is a dark, textured grey. The overall effect is one of dynamic energy and complex, interconnected systems.

**A “BORRACHA QUÂNTICA” APLICADA COMO
ATIVIDADE EXPERIMENTAL NO ENSINO DA FÍSICA
QUÂNTICA PARA ALUNOS DO ENSINO MÉDIO**

*Imagem disponível em: https://miro.medium.com/max/700/1*BdFp71spjnPraBV8FI4T0Q.png*

FRANCISCO MIRANDA MONTEIRO JÚNIOR

DENILSON DA SILVA BORGES

**A “BORRACHA QUÂNTICA” APLICADA COMO ATIVIDADE
EXPERIMENTAL NO ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA PARA
ALUNOS DO ENSINO MÉDIO**

SÚMARIO

Apresentação.....	04
A construção da atividade experimental: a “borracha quântica”.....	06
A sequência como proposta para o ensino da física quântica para alunos do ensino médio.....	12
1° aula.....	12
2° aula.....	12
3° aula.....	13
4° aula.....	13
5° aula.....	14
6° aula.....	14
7° aula.....	15
Recomendações.....	16
Conclusão.....	17
Referências bibliográficas.....	18
Exemplar da avaliação diagnóstica.....	19

APRESENTAÇÃO

As atividades que compõem este trabalho derivam de uma situação-problema que envolve a falta de equipamentos didáticos para melhor explicar a física quântica em sala de aula, seja ela do ensino médio ou até mesmo do ensino superior. E esta dificuldade se dá devido a particularidade da própria natureza da física quântica: uma natureza microscópica.

O objetivo do desenvolvimento deste produto está relacionado a uma introdução dos conceitos, princípios e fenômenos que regem a parte básica da física quântica, com o intuito de dar apoio ao professor durante explicações sobre o assunto abordado e de propor aos alunos uma compreensão através de uma atividade experimental, além de melhor disseminar esta ciência que é muito citada, porém bem pouco compreendida.

Para os alunos e curiosos, este material possibilita uma visão de alguns conceitos e fenômenos quânticos, porém, não podemos deixar de destacar que o que a atividade experimental proporciona são visualizações de um campo nada quântico, é apenas algo para ilustrar alguns fenômenos. Auxiliando assim na construção do conhecimento, seguindo as orientações do professor.

O motivo em trabalhar com tal ciência se baseou em algumas perspectivas como: Trazer algo diferente para sala de aula com o intuito de melhor explicar a física quântica e seus princípios; a dificuldade em materiais experimentais que abordam tal assunto, mesmo que sejam materiais que lembrem os efeitos quânticos; disseminar tal ciência, além do que as histórias em ficção já citam, porém organizando o senso comum que muitos já possuem elencados por personagem fictícios. Pois é para onde estamos nos dirigindo quando diz respeito a modernização, a física quântica tem sido e será a ciência do futuro.

Portanto aqui apresentamos, uma proposta sobre o ensino da física quântica para alunos do ensino médio, por meio de uma sequência didática a partir dos estudos de conceitos e de uma atividade experimental “a borracha quântica”, com o intuito de tornar as aulas mais prazerosas, onde parte da elaboração da atividade experimental será montada pelos alunos que receberam

auxílio, explicações e monitoria por parte do professor. Um trabalho que será desenvolvido em conjunto contribuindo assim para uma compreensão dos conceitos relacionado ao tema.

Como citado acima, esta sequência de ensino foi pensada em uma metodologia em que o professor aparecesse como um auxiliador, funcionando como um mediador. Desta forma permitiria uma autonomia do aluno fazendo-o assim um ator importante do próprio conhecimento.

As escolas de ensino básico, em sua maioria encontram-se com um grande déficit de equipamentos com material (ou kits) para as atividades experimentais para o ensino da física. Quando se trata de campos microscópicos, nos deparamos com praticamente nada para esta área específica da física.

Estamos habituados a observar a natureza a partir de uma óptica macroscópica. Ou seja, observamos a natureza nos domínios da mecânica newtoniana. No nível quântico, construímos as leis físicas baseado no que observamos, ou melhor, baseado nos fenômenos que a natureza nos revela: é o que chamamos de “observáveis”.

A atividade experimental da borracha quântica (apagador quântico) tem como objetivo uma possível visualização de algo que parece muito distante de se observar, ou muitas vezes de algo que julgamos ser abstrato, dentro de um contexto de probabilidade da natureza dual da luz (onda-partícula).

A aplicação desta atividade experimental, que consiste em uma apresentação de dupla fenda, irá nos permitir explorar algumas características da física quântica, como observar que é impossível saber o caminho a ser escolhidos pelas partículas da luz (fótons), o princípio da superposição e interferência quântica.

A CONSTRUÇÃO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL: A “BORRACHA QUÂNTICA”

O nosso trabalho foi baseado em um artigo publicado na Scientific American Internacional em maio de 2007, intitulado como “FAÇA VOCÊ MESMO UMA BORRACHA QUÂNTICA” por Rachel Hillmer e Paul Kwiat. Retiramos a ideia para a realização deste trabalho e a transformamos em uma sequência de ensino para alunos curiosos do ensino médio que queiram se aventurar ou conhecer um pouco desta área da física.

Mas, o processo para a construção da nossa “borracha quântica” procurou inspiração na produção de Jorge Faccipieri Junior do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas.

MATERIAIS UTILIZADOS

- 1- Local escuro e um anteparo: Esta é uma condição necessária.
- 2- Filmes polarizadores: Esse material pode ser obtido de telas de LCD de monitores que não funcionem mais. Trata-se de uma película escura, fácil de ser encontrada, mas se faz necessário um cuidado na hora da extração do material.

Figura 1: Extração do filme polarizador de uma tela LCD não utilizável.



Fonte: Própria, 2019.

- 3- Laser-pointer: Utilizamos um laser comum, desses utilizados em apresentações de coloração esverdeada e com comprimento de onda de aproximadamente 532 nm.

Figura 2: Apontador a laser verde.



Fonte: Própria, 2019.

- 4- Fio fino: Quanto mais fino for o fio melhor será a apresentação das franjas a serem formadas. Demos preferência por pontas de grafites de lapiseiras de 0,5mm, mas sua única desvantagem é a sua fragilidade, quebram com muita facilidade.

Figura 3: Ponta de grafite 0,5 mm.



Fonte: Própria, 2019.

- 5- Suportes: para os suportes podem ser utilizados diversos materiais como: Isopor, fita adesiva, anéis de suportes universais para laboratório de diâmetro 5 cm, pregador de roupa e madeira.

Figura 4: Suportes de isopor, anéis de laboratório e o pregador de roupa



Fonte: Própria, 2019.

GUIA PARA MONTAGEM EXPERIMENTAL:

- 1- Inicia-se o preparo para a execução do aparato com os suportes. Utilizamos madeira como base com 50 cm de comprimento e 14 cm de largura para a atividade experimental e para confeccionar uma base para o laser pointer (com a finalidade de apoiar o laser sem termos que ficar segurando).
- 2- Em seguida fura-se o suporte com o intuito de colocar os anéis de suporte de laboratório, a uma distância de aproximadamente de 20 cm.

Figura 5: Suporte borracha quântica, corresponde ao número 5 da figura e suporte para o laser que corresponde ao número 2 da figura.



Fonte: Própria, 2019.

- 3- Finalizada a estrutura da base, iremos para outro suporte. O suporte do identificador de caminho e da borracha quântica. Utiliza-se isopor com dimensões externas 10 cm x 10 cm e interna 5 cm x 5 cm. Como temos um identificador de caminho e duas borrachas quânticas, confeccionamos 3 suportes de isopor.
 - 4- Depois de extraído o filme polarizador, corta-se ele em pedaços pequenos e aconselhamos ter cuidado no momento da identificação. O primeiro corte foi o identificador de caminho, onde deve-se cortar dois pedaços do polarizador em dimensões de 3,5 cm x 7,5 cm, porém esse corte não pode ser feito de qualquer jeito, o cuidado está no direcionamento do polarizador, identificamos com V de vertical e H de horizontal. Utiliza-se de fita adesiva para unir ao máximo os polarizadores como mostrado na figura 6 e em um segundo momento ainda com o identificador colocamos o nosso fio fino, a ponta de grafite de 0,5 mm, ela é posta bem na divisa do identificador de caminho. O intuito dela neste momento da confecção concentra-se em esconder o espaço deixado entre os dois polarizadores conforme mostrado na figura 7.
- O segundo corte seria um pedaço do polarizador de dimensões 3,3 cm x 7,5 cm, o identificamos apenas como horizontal, consequentemente o oposto seria o vertical (Fig. 8) e o terceiro corte foi feito dimensões de 6,5 cm x 7,5 cm, o diferencial deste corte foi que o extraímos formando um ângulo de 45° e para identificação deste polarizador

fizemos um corte em uma das pontas, para identifica-lo como sendo o polarizador de 45°.

Estes dois últimos cortes são as nossas “borrachas quânticas”.

Figura 6: Identificador de caminho sem a ponta de grafite.



Fonte: Própria, 2019.

Figura 7: Identificador de caminho com a ponta de grafite para esconder a abertura entre os dois polarizadores.



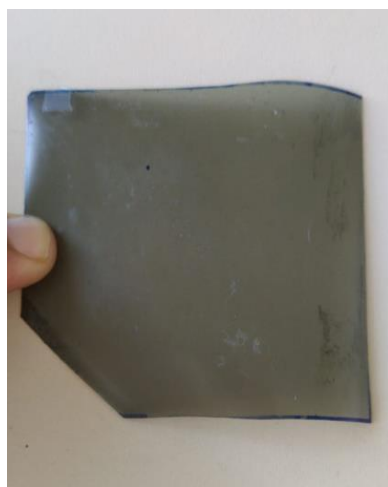
Fonte: Própria, 2019.

Figura 8: “Borracha quântica” na horizontal e na vertical.



Fonte: Própria, 2019.

Figura 9: “Borracha quântica de 45°.



Fonte: Própria, 2019.

- 5- Em seguida, gruda-se nosso identificador de caminho e as nossas “borrachas quânticas” no isopor (suporte). O pregador de roupa tem como finalidade pressionar o botão do laser pointer com o intuito de mantê-lo ligado, sem a necessidade de ficarmos pressionando.

E por fim, a nossa atividade experimental está pronta para ser utilizada conforme a figura 10.

Figura 10: Atividade experimental da borracha quântica produzida por Francisco Miranda.



Fonte: Própria, 2019.

A SEQUÊNCIA COMO PROPOSTA PARA O ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA PARA ALUNOS DO ENSINO MÉDIO

A nossa sequência de ensino conta com 7 passos ou sete aulas, que são elas:

1º Aula: 1º Avaliação diagnóstica (45 minutos)

Objetivo: Avaliar o conhecimento prévio dos alunos com relação a física quântica.

Procedimento didático: Iniciar com a recepção dos alunos, explicando a eles que faremos uma avaliação com o intuito de analisar o que eles conhecem e entendem sobre o significado de alguns conceitos da física quântica. Para conseguir obter estes registros deve-se realizar a 1º avaliação diagnóstica. O tempo para a realização desta avaliação será de 45 minutos. A 1º avaliação diagnóstica consta de 7 questões objetivas e que foram utilizadas em vestibulares.

2º Aula: Luz e radiação eletromagnética (45 minutos)

Objetivo: Explicar sobre a evolução dos conceitos da luz até chegarmos a ideia de radiação eletromagnética.

Procedimento didático:

1º momento: Passearemos sobre a visão de algumas diferentes épocas e de alguns diferentes povos, a procura de um conceito para o que é a luz e do que ela é formada, recomenda-se a utilização de apresentações em power point para que se possa visualizar o roteiro de pensamento de alguns povos antigos até o embate entre Newton e Huygens, ou seja, levantando a discussão se a luz é de natureza ondulatória ou corpuscular. Nesta aula, se faz necessário o debate entre essas duas formas de definições. Definiremos a interferência com um vídeo sobre ondas mecânicas e através de imagens definição da luz como onda segundo Huygens.

2º momento: Nessa etapa definimos luz como onda eletromagnética com o intuito de chegarmos à explicação radiação eletromagnética. Nessa etapa,

também pode ser apresentado aos alunos um dos materiais utilizados na nossa atividade experimental, o laser pointer. Inicia-se a montagem das bases de madeira e onde o laser pointer irá ficar localizado.

3º Aula: Polarização da luz (45 minutos)

Objetivo: Comentar a ideia da polarização, os polarizadores e a polarização da luz.

Procedimento didático:

1º momento: A conceituação do termo polarização em demais esferas sociais é de grande ajuda para conseguirmos atingir o nosso objetivo maior desta aula que será de definir a polarização da luz, para isso sugerimos que comece com diferentes exemplos da palavra polarização empregada em no âmbito social. Passaremos para uma animação computacional sobre a polarização agindo em uma corda.

2º momento: A visualização do vídeo “Como identificar a película polarizadora correta” que se encontra no seguinte endereço eletrônico aberto ao público, <https://www.youtube.com/watch?v=42VYx4E21mk>. Este vem nos ajudar a observar principalmente a importância do emprego correto do filme polarizador. Além de nos mostrar o comportamento se for colocado de forma inadequada. E então, chegaremos a definição da polarização da luz, o seu comportamento e os seus efeitos como onda eletromagnética.

3º momento: Finalizado os dois momentos, nos voltamos para a nossa atividade experimental, onde colocaremos os polarizadores nos suportes, identificaremos o identificador de caminho e as “borrachas quânticas”.

4º Aula: Introdução histórica (45 minutos)

Objetivo: Compreender o momento do surgimento da física quântica.

Procedimento didático:

1º momento: Inicia-se comentando o momento em que a física passava, comentaremos a conferência na Royal Society em março de 1900 onde se debateu a “completude” da física pelo nobre cientista Lorde Kelvin. Continua-se

citando as dificuldades e os problemas a serem solucionados da época, até chegarmos aos dois problemas que deram início ao surgimento da teoria da relatividade e da física quântica.

2º momento: passaremos a comentar mais fortemente o assunto que diz respeito a física quântica (corpo negro, a teoria dos quanta, efeito fotoelétrico, a natureza da luz, dualidade onda-partícula e os princípios da física quântica).

Os dois primeiros momentos devem ser voltados a explanação de conceitos relacionados ao estudo e compreensão da parte introdutória da física quântica. Lembrando e devendo se levar em consideração que trataremos de alunos que possuem um conhecimento um pouco mais aprofundado no cálculo.

5º Aula: Dualidade onda-partícula (45 minutos)

Objetivo: Explicar a ideia de dualidade e o que seria a dualidade onda-partícula para a física quântica.

Procedimento didático:

1º momento: Nesse momento é feita uma breve introdução explicando o que seria a dualidade, procurando trazer como lembrança o que foi estudado anteriormente (os fatos históricos), comentaremos o experimento de fenda dupla através de animações computacionais. E por fim, deste primeiro momento, adentraremos nos conceitos da dualidade onda-partícula, explanando a hipótese de De Broglie e os princípios da complementariedade e da incerteza.

2º momento: Como forma de revisar todo o conteúdo explanado ao longo das aulas anteriores incluindo esta aula, assistiremos a uma pequena animação intitulada como “física quântica: experimento da fenda dupla” disponível no seguinte endereço <https://www.youtube.com/watch?v=GXAYW4a3OZY&list=PLJ33OIBTtlq8IG6IZdVcD8cVklR80Ug-&index=2>

6º Aula: A atividade experimental da “borracha quântica”

Objetivo: Manusear o experimento e ilustrar os efeitos quânticos citados.

Procedimento didático: Após passarmos por todas as aulas necessárias para explicar os materiais utilizados, procedimentos a serem seguidos, o

conteúdo básico através dos conceitos e montagem do aparato. Como alicerce para a nossa sequência de ensino, nesta aula passaremos o nosso tempo explorando a atividade experimental, onde os alunos devem estar livres para o manuseio do aparato. E o professor terá como papel mediar os feitos dos alunos. Controlando-os, questionando-os e dando dicas dos passos a serem seguidos pelos alunos.

Primeiramente sugerimos a identificação do fenômeno de interferência, em seguida passarmos para o identificador de caminho e por fim a aplicação da borracha quântica e então a verificação da mesma no sentido de apagar eventos anteriores, sempre fazendo ligação aos princípios que regem a física quântica.

O intuito dessa forma de moldagem concentra-se em ter um aproveitamento satisfatório e uma administração do próprio tempo de aula.

7º Aula: 2º Avaliação diagnóstica (45 minutos)

Objetivo: Avaliar o conhecimento adquirido após a aplicação da sequência de ensino e da atividade experimental.

Procedimento didático: A aplicação da 2º avaliação diagnóstica consiste em reaplicar a mesma avaliação inicial. O intuito desta avaliação é verificar se após a apresentação da sequência de ensino o aluno compreendeu o que seriam os conceitos básicos que regem a física quântica, além de mostrar uma opção para se ensinar a física quântica.

Após a realização desta atividade avaliativa, finalizaremos nossa sequência de ensino, agradecendo a participação e a atenção dos alunos. As avaliações diagnósticas devem ser corrigidas procurando analisar os erros, as dúvidas e verificando se houve aprendizagem por parte dos alunos.

RECOMENDAÇÕES

É importante deixar bem claro que o que estará sendo abordado não é o “reino” ou “universo” quântico, como muitas vezes pode ser citado ou indagado por algum aluno, pois é assim que algumas nomenclaturas se referem a esta ciência.

Também é de suma importância lembra-los que o que será visto é apenas imagens que estão nos servindo como apoio para uma melhor explanação e algo que não representa a realidade, pois nossa natureza é algo macroscópica e o campo de atuação da física quântica é de natureza microscópica, ou seja, que foge completamente da nossa percepção.

Porém, muito embora a atividade experimental da “borracha quântica” possa nos auxiliar de forma majestosa na concepção da aquisição dos conceitos que regem os princípios e os principais fenômenos da física quântica, ou pelo menos os necessários para começarmos uma compreensão desta curiosa ciência.

Aproveitamos para recomendar uma boa leitura no que diz respeito a história da física quântica por parte do professor para melhor auxiliar os seus alunos, assim como uma interação entre os alunos é necessária para que um ajude o outro em visualizações e na formação de opiniões.

E por fim, ao final da aplicação de toda a proposta didática, ao ser constatada alguma dúvida, que esta seja retirada logo de imediato a fim que dar por finalizada a proposta e quem sabe dar início a outra maneira de se ensinar a física quântica.

CONCLUSÃO

Este material em suas aplicações preliminares se mostrou eficaz quanto ao seu objetivo, tornando uma ferramenta de grande auxílio quando diz respeito ao ensino da física quântica. Lembrando que, o nosso material não demonstra o que é a natureza quântica, estamos distantes disso, porém esta atividade nos permitiu explorar caminhos que demonstram o que seria o princípio da incerteza de Heisenberg, o princípio da superposição e interferência quântica.

Alicerçados com a história da física, esta atividade ganha mais riqueza com o significado e melhor compreensão do momento vivido e como foram feitas tais descobertas. A busca de materiais de uso do cotidiano para a implementação da nossa atividade experimental nos fez observar que em pequenos adereços já “se trabalha com conceitos da física quântica”, restando apenas um olhar mais carinhoso e crítico para percebermos o que mais temos da física quântica ao nosso redor.

Ao entender que estudar a física quântica é um tanto complexo, trouxemos neste material uma forma de trabalharmos os conceitos iniciais para o entendimento do que seria a física quântica e assim poderemos entender o motivo de tanta disseminação desta ciência, assim como o aparecimento repentino em diversos tipos de filmes. Nosso produto é apenas um ponto de partida para os estudos introdutórios, uma vez que a precariedade das ferramentas demonstrativas da física quântica seja bem elevada.

Por fim, nosso produto traz consigo uma sequência de ensino e a utilização de uma atividade experimental “a borracha quântica” assim como a sua utilização e onde encontrarmos os materiais utilizados. Deixando uma ferramenta de ensino e de baixo custo, procurando tornar as aulas de tal conteúdo atrativa e participativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSUBEL, D.P. A aquisição e retenção de conhecimento: uma visão cognitiva. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.

AUSUBEL, D.P. Psicologia educacional: uma visão cognitiva. New York: Holt, Rinehart e Winston, 1968.

BACHELARD, G. A formação do Espírito Científico. Trad. Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BRASIL, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. PCNs Ensino Médio: Parte III - Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, SEMTEC, 2000.

HILLMER, R.; KWIAT, P. Faça você mesmo uma Borracha Quântica. Scientific American Brasil. Nº 61, P. 76-81, junho 2007.

JÚNIOR, F. R. & FERRARO, N. G. & SOARES, P. A. T. Os Fundamentos de Física. Vol. 3. São Paulo, Moderna, 2003

EXEMPLAR DA AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA

Avaliação diagnóstica

1. Na coluna da esquerda, estão listados eventos ou situações físicas; na da direita, grandes áreas das teorias físicas.

1. Descrição de sistemas que envolvam objetos que se movam com velocidades próximas da velocidade da luz.	(a) Física Clássica
2. Descrição de fenômenos que ocorrem em dimensões muito pequenas, como as de um átomo.	(b) Física Quântica
3. Unificação da Eletricidade e Magnetismo, conforme realizada por Maxwell.	(c) Física Relativística

A alternativa que relaciona corretamente o evento ou situação com a área usada para descrevê-lo é

- a) 1(a), 2(b) e 3(c).
- b) 1(a), 2(c) e 3(b).
- c) 1(b), 2(c) e 3(a).
- d) 1(c), 2(a) e 3(b).
- e) 1(c), 2(b) e 3(a)

2. No contexto histórico da virada do século XIX para o século XX, Lord Kelvin proferiu uma palestra e afirmou que não havia mais muitos pontos obscuros para serem resolvidos pela Física. Destacou que existiam apenas dois problemas: o primeiro referente a não detecção do vento de éter (resultado nulo do experimento de Michelson-Morley), e o segundo, relacionado à partição de energia (emissão e absorção da radiação de corpo negro). Em relação ao avanço na construção de conhecimento em Física, decorrente dos dois problemas apontados por Lord Kelvin, assinale a alternativa **correta**.

- a) Os pontos obscuros apontados por Lord Kelvin não se configuraram em problemas científicos, e foram ignorados pela Ciência.
- b) Os problemas sinalizados por Lord Kelvin foram solucionados pela mecânica newtoniana, sendo necessário apenas um refinamento experimental.
- c) A Ciência, em particular a Física, não avançou mediante a resolução de problemas e aos pontos obscuros apontados por Lord Kelvin, que retratavam apenas dúvidas pessoais dele próprio.
- d) Max Planck foi o único a solucionar os dois problemas apontados por Lord Kelvin e, por isso, Planck é considerado por muitos o “Pai da Mecânica Quântica”.
- e) Os pontos obscuros destacados por Lord Kelvin foram determinantes na condução de mudanças radicais na Física, culminando na construção das teorias quânticas e relativísticas.

3. O princípio da incerteza de Heisenberg trata da

- a) incerteza do conhecimento da Física de que tudo é sempre relativo e nunca definitivo.
- b) imprecisão de definir as coordenadas de posição e o momento linear de uma partícula quântica simultaneamente, ao longo de uma direção.
- c) dificuldade de encontrar um elétron nas camadas de valência do átomo.
- d) dilatação do tempo e contração dos objetos ao atingirem velocidade próxima à da luz.
- e) variação de entropia e o sentido da seta do tempo.

4. O físico francês Louis de Broglie (1892-1987), em analogia ao comportamento dual onda-partícula da luz, atribuiu propriedades ondulatórias à matéria.

Sendo a constante de Planck $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, o comprimento de onda de Broglie para um elétron (massa $m = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$) com velocidade de módulo $v = 2,2 \times 10^6 \text{ m/s}$ aproximadamente,

- a) $3,3 \times 10^{-10} \text{ m}$.
- b) $3,3 \times 10^{-9} \text{ m}$.
- c) $3,3 \times 10^3 \text{ m}$.
- d) $3,0 \times 10^9 \text{ m}$.
- e) $3,0 \times 10^{10} \text{ m}$.

5) Na história da física, existem vários exemplos de conceitos que exigiram revisão ou mesmo substituição, quando novos dados experimentais se opuseram a eles. Em relação à natureza do

comportamento da luz, isso não foi diferente, sendo resolvido somente no último século pela Mecânica Quântica. Qual é a natureza do comportamento da luz para a Mecânica Quântica?

- a) Natureza corpuscular.
- b) Natureza ondulatória.
- c) Natureza dual, ou seja, às vezes se comporta como onda e às vezes como partícula.
- d) Natureza dual, ou seja, sempre se comporta como partícula.
- e) Natureza dual, ou seja, sempre se comporta como onda.

6) O dualismo onda-partícula refere-se a características corpusculares presentes nas ondas luminosas e as características ondulatórias presentes no comportamento de partículas, tais como elétrons. A natureza nos mostra que características corpusculares e ondulatórias não são antagônicas, mas sim complementares. Dentre os fenômenos listados, o único que não está relacionado com o dualismo onda-partícula é:

- a) o efeito fotoelétrico.
- b) a ionização de átomos pela incidência de luz.
- c) a difração de elétrons.
- d) o rompimento de ligações entre átomos pela incidência de luz.
- e) a propagação, no vácuo, de ondas de rádio de frequência média.

7) O modelo atômico de Bohr, aperfeiçoado por Sommerfeld, prevê órbitas elípticas para os elétrons em torno do núcleo num sistema planetário. A afirmação “um elétron encontra-se exatamente na posição de menor distância ao núcleo com velocidade exatamente igual a 10^7 m/s” é correta do ponto de vista do modelo de Bohr, mas viola o princípio:

- a) da relatividade restrita, de Einstein.
- b) da conservação da energia.
- c) de Pascal.
- d) da incerteza de Heisenberg.
- e) da conservação de momento linear.