

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

LUCIANO SLOVINSKI

**O EXPERIMENTO DA BORRACHA QUÂNTICA: USO DE ANALOGIAS PARA O
ENTENDIMENTO DO QUÂNTICO PELO CLÁSSICO**

PORTO ALEGRE

2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

**O EXPERIMENTO DA BORRACHA QUÂNTICA: USO DE ANALOGIAS PARA O
ENTENDIMENTO DO QUÂNTICO PELO CLÁSSICO**

LUCIANO SLOVINSCKI

Dissertação realizada sob a orientação do professor Dr. Alan Alves Brito, e apresentada no Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em preenchimento parcial aos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Física.

PORTO ALEGRE

2017

Agradecimentos

À Deus, por me permitir trilhar o caminho sem esmorecer.

À minha esposa Raquel, grande companheira e incentivadora em todos os momentos, e que me faz ser uma pessoa melhor a cada dia, obrigado pelo amor e paciência dispensados nesse período.

À minha família, em especial minha mãe Lucilena, que me ensinou o valor da educação e me proporcionou condições de chegar até aqui.

Ao Comandante do Colégio Militar de Porto Alegre, estendido aos demais colegas de trabalho, meu sincero agradecimento pela oportunidade de poder me dirigir aos alunos na função de docente.

Aos alunos do Colégio Militar de Porto Alegre, minha gratidão pela excelente participação e auxílio na condução do projeto que ora se materializa.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, em especial ao professor Glauco Ribas, grande amigo e colega, meu muito obrigado pela parceria, apoio, troca de experiências e lembranças que sempre povoarão minha memória.

Ao meu orientador, professor Dr. Alan Alves Brito, profissional exemplar, amigo, que sempre se colocou à disposição para que essa dissertação se tornasse possível.

Ao professor Ms. Luiz Carlos Gomes, coordenador da disciplina de Física do Colégio Militar de Porto Alegre, que muito colaborou neste projeto, do planejamento à execução, minha sincera gratidão.

Aos professores Dr. Paulo Pureur Neto, Dra. Neusa Teresinha Massoni e Dr. Alexander Lunkes dos Santos meus sinceros agradecimentos, pois muito contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos mestres do Instituto de Física da UFRGS, que de algum modo contribuíram com minha formação, e ajudaram a moldar este professor.

RESUMO

As pesquisas sobre o Ensino de Física no Brasil, apoiadas nos documentos oficiais da Educação e na necessidade, cada vez mais perceptível, de atualização dos currículos, indicam e fomentam uma maior articulação de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) nas aulas de Física do Ensino Médio. Baseado nesse panorama, este trabalho sugere uma proposta educacional alicerçada no referencial teórico da aprendizagem significativa de David Ausubel para apresentar uma abordagem qualitativa dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica sob uma perspectiva histórica, amparada em fatos científicos que antecederam a interpretação de Erwin Schrödinger da teoria quântica. Os conceitos levados aos estudantes foram baseados nos seis postulados da Mecânica Quântica, e passaram por um processo de transposição didática segundo a teoria de Yves Chevallard, de forma a adaptar os conteúdos ao nível de conhecimento dos estudantes. Como, segundo Ausubel, o fator decisivo para a aprendizagem depende do que o estudante já conhece, os encontros foram pautados, sempre que possível, em analogias entre o quântico e o clássico. Para atingir os objetivos de aprendizagem, lançou-se mão de uma variada gama de experimentos reais e virtuais. O uso de simulações computacionais mostrou-se uma valiosa ferramenta de apoio ao ensino, bem como o experimento da borracha quântica, figura central desta proposta didática, que permitiu a demonstração e a discussão de todos os conceitos tratados. Os resultados obtidos pelos alunos mostraram que boa parte deles conseguiu assimilar aquilo que se pretendeu ensinar, havendo indícios de aprendizagem significativa. A aplicação do projeto se deu no Colégio Militar de Porto Alegre, a uma turma de 36 alunos, majoritariamente do 3º Ano do Ensino Médio, durante o segundo semestre de 2016.

Palavras-chave: Ensino de Física, aprendizagem significativa, transposição didática, Mecânica Quântica, borracha quântica.

ABSTRACT

Studies about Teaching Physics in Brazil, supported by official documents in Education and by the necessity, increasingly noticeable, of curriculum update, indicate and promote a greater articulation of topics of Modern and Contemporary Physics (MCP) in High School physics classes. Based on this overview, this work suggests an educational proposal underpinned by David Ausubel's Meaningful Learning theoretical framework to present a qualitative approach of fundamental principles of Quantum Mechanics, from a historical perspective and supported by scientific facts that preceded Erwin Schrödinger's interpretation of quantum theory. The concepts delivered to the students were based on six postulates of Quantum Mechanics and went through a process of didactic transposition according to Yves Chevallard's theory, in a way to adapt the content to students level of knowledge. According to Ausubel's theory, the decisive factor for learning depends on what the student already knows, and thus the meetings were based, whenever possible, on analogies between the quantum and the classical approach. To reach the learning objectives, we used a wide range of real and virtual experiments. The use of computational simulations proved to be a valuable tool to support teaching. The quantum eraser experiment, in particular, central figure of this didactic proposal, allowed the demonstration and discussion of all the addressed concepts. Results showed that most of students could assimilate what was intended to be taught, suggesting meaningful learning. The project was implemented in the Military College of Porto Alegre to a group of 36 students, mostly from the third year of high school, during the second semester of 2016.

Key words: Teaching Physics, meaningful learning, didactic transposition, Quantum Mechanics, quantum eraser.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTUDOS RELACIONADOS	7
2.1 A FMC no Ensino Básico	7
2.2 Relações entre o clássico e o quântico	8
2.3 Uso de analogias no Ensino de Física.....	10
2.4 Os documentos oficiais da Educação no Brasil	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel	14
3.2 O conceito de transposição didática de Yves Chevallard	18
4. METODOLOGIA E CONTEXTO DE APLICAÇÃO DO PROJETO	23
4.1 Contextualização do espaço didático	23
4.2 Contexto de aplicação do projeto.....	26
4.3 Metodologia	27
5. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES E NARRATIVA DE APLICAÇÃO DA PROPOSTA DIDÁTICA.....	34
5.1. Primeiro Encontro – Contextualização histórica e bases do surgimento da Mecânica Quântica no século XX	36
5.2. Segundo Encontro – Discussões a respeito da luz: onda ou partícula?	37
5.3. Terceiro Encontro – A Mecânica Quântica: principais conceitos e curiosidades.....	40
5.4. Quarto Encontro – A borracha quântica: discussão e apresentação do experimento	43
5.5. Quinto Encontro – Contextualização do mundo quântico que nos rodeia.....	54
5.6. Sexto Encontro.....	58
5.7. Simulações computacionais utilizadas nos encontros.....	58
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	74
6.1 Teste Inicial.....	74
6.2 Teste Final.....	82
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
9. APÊNDICES	103
Apêndice A – Guia da Aula 1	103
Apêndice B – Guia da Aula 2	105
Apêndice C – Guia da Aula 3	107

Apêndice D – Guia da Aula 4.....	109
Apêndice E – Teste Inicial.....	111
Apêndice F – Teste Final.....	113
Apêndice G – Produto Educacional.....	117
APRESENTAÇÃO.....	119
REFERENCIAIS TEÓRICOS.....	121
PROPOSTA DIDÁTICA.....	124
Primeiro Encontro: Contextualização histórica e bases do surgimento da Mecânica Quântica no século XX.....	127
Segundo Encontro: Discussões a respeito da luz: onda ou partícula?.....	140
Terceiro Encontro: A Mecânica Quântica: principais conceitos e curiosidades.....	159
Quarto Encontro: A borracha quântica: discussão e apresentação do experimento ...	176
Quinto Encontro: Contextualização do mundo quântico que nos rodeia.....	195
APÊNDICES.....	211
Apêndice A – Guia da Aula 1.....	211
Apêndice B – Guia da Aula 2.....	213
Apêndice C – Guia da Aula 3.....	215
Apêndice D – Guia da Aula 4.....	217
Apêndice E – Teste Inicial.....	219
Apêndice F – Teste Final.....	221
REFERÊNCIAS.....	225

1. INTRODUÇÃO

A Teoria da Relatividade Restrita de Einstein, publicada em 1905 na *Annalen der Physik* sob o título “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, marca, dentro da história da ciência, o fim da era da Física Clássica e o nascimento da Física Moderna e Contemporânea. Einstein ainda publicaria outros artigos naquele mesmo ano, de forma que 1905 ficaria conhecido como *annus mirabilis*. De lá para cá, temos mais de um século de estudos nesse novo campo da Física e incontáveis avanços tecnológicos advindos da teoria. Apesar disso, o ensino de Física formal, principalmente no Ensino Médio, contempla a quase totalidade de seus currículos com assuntos de Física Clássica.

A inserção de assuntos relacionados à Física Moderna e Contemporânea (FMC) é algo defendido por pesquisadores da área de Ensino de Física há bastante tempo. Documentos como os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 1998) e as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002), além das Orientações Curriculares para o Ensino Médio (BRASIL, 2006) e das Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais da Educação Básica (BRASIL, 2013), oficializam esse desejo.

O ato de ensinar é um desafio. O ensino da Física parece ser um desafio ainda maior, haja vista as dificuldades normalmente apresentadas pelos estudantes do Ensino Médio no contato com os conceitos da Física. Muitos desses conceitos não são intuitivos. Ademais, aliando-se isso à falta de intimidade da maioria de nossos estudantes com a Matemática, o cenário se torna ainda mais desafiador. Não obstante, parece haver hoje em dia um verdadeiro abismo entre a Física ensinada na sala de aula e a verificada no dia a dia dos estudantes. O que fazer, diante dessa situação? Procurar novas alternativas, em contrapartida ao ensino tradicional da Física, parece ser o melhor caminho.

A quase totalidade dos produtos e inovações tecnológicas a que nossos estudantes têm acesso é baseada em concepções e argumentos físicos que a esmagadora maioria deles jamais virá a tomar contato de maneira formal, em sala de aula. Enquanto isso, aos olhos dos currículos e livros didáticos atuais, a Mecânica Newtoniana não cede espaço, tampouco permite a

interação ou uma maior articulação das Mecânicas Quântica e Relativística. Não é do interesse deste trabalho discutir qual ramo da Física tem mais importância na sala de aula, mas sim reforçar que a FMC deve ocupar um espaço maior do que ocupa atualmente. O estudante tem o direito de se aproximar dos conceitos da FMC, a fim de se tornar um cidadão mais crítico e preparado, além de cumprir o que estabelecem os documentos oficiais da Educação no Brasil.

Vários autores já defenderam uma maior inserção da FMC nos livros didáticos, currículos e, como consequência, na sala de aula. Greca et al. (2001) argumentam que um número cada vez maior de pesquisas é realizado nesse sentido devido à extrema importância da FMC, em especial a Mecânica Quântica, a grande sensação da Física nos séculos XX e XXI. Tais pesquisas ressaltam a relevância do assunto perante os próprios jovens, muitas vezes interessados em discutir, na sala de aula, questões como buracos negros, aceleradores de partículas e outros temas relacionados à FMC. Da mesma forma, Gil et al. (1988), Terrazzan (1992) e Ostermann e Moreira (2000) também fazem uma crítica aos currículos da época, que pouco abrangiam assuntos de FMC.

Então, se é intenção fomentar o ensino da FMC no Ensino Médio, qual a melhor estratégia para fazê-lo? Os trabalhos apresentados por Ricci et al. (2007), que tentaram estabelecer uma conexão entre assuntos clássicos e quânticos, e Silva e Júnior (2014), que partem de uma abordagem semiclássica a uma abordagem quântica na discussão do efeito Compton, parecem ser uma boa maneira de diminuir a distância entre essas duas áreas.

A abordagem histórica da evolução dos conceitos da Física é outra estratégia interessante, e que foi levada em consideração neste trabalho. Silva e Júnior (2014) discutem a descoberta do efeito Compton sob uma perspectiva histórica, mostrando detalhadamente o desenvolvimento do conceito elaborado por Compton.

Seguindo esses exemplos citados, pretendeu-se, então, explorar com estudantes do Ensino Médio os princípios fundamentais da Mecânica Quântica, através diversas simulações computacionais, e do experimento da borracha quântica (HILLMER; KWIAT, 2007). Apesar do experimento ser completamente descrito pela Mecânica Clássica (uma vez que não conta com nenhum aparato tecnológico, nem consegue manipular fótons individualmente), seus resultados experimentais clássicos podem servir de excelente análogo para o entendimento de fenômenos quânticos. Um esquema simplificado da borracha quântica pode ser visualizado na Figura 1.1.

O arranjo experimental pode ser descrito sucintamente como um aparato no qual se tem: uma fonte emissora de luz polarizada (laser); uma junção de dois filmes polarizadores fixos

(identificador de caminho), orientados perpendicularmente entre si e com um arame fino na interseção de ambos, a fim de servir de obstáculo ao feixe de luz; um outro polarizador (analisador), cuja orientação pode ser ajustada em relação ao identificador de caminho; um anteparo, onde se formarão padrões que serão identificados como sendo características de onda (figura de interferência) ou partícula (vulgo “borrão”).

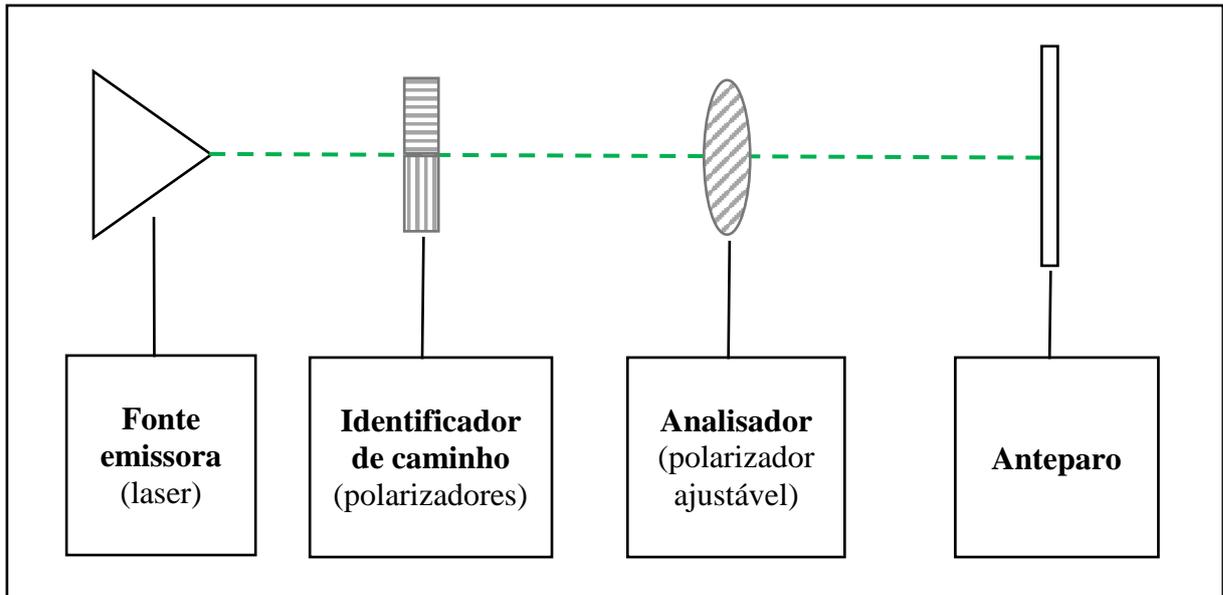


Figura 1.1: representação esquemática de uma borracha quântica (forma completa). FONTE: o autor.

O experimento, configurado inicialmente apenas com o feixe de luz passando por um pequeno obstáculo (arame fino), sem nenhum polarizador, serve como análogo ao consagrado experimento da dupla fenda de Young, e permite discutir alguns dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, como a função de onda, os estados permitidos, a superposição de estados e a probabilidade de observação de cada um dos estados permitidos. Nessa configuração, será formado no anteparo um padrão de franjas de interferência, pois pode-se entender, quanticamente, que cada fóton que passa pelo obstáculo interfere consigo mesmo. Ao se trocar o arame fino pelo identificador de caminho, a figura de interferência, projetada no anteparo, dá lugar a um borrão. Sob a perspectiva da Mecânica Quântica, isso equivale a se tentar realizar uma medição sobre por qual lado do arame o fóton está passando, uma vez que os polarizadores estão tentando obter alguma informação dos fótons. Isso ocasiona o colapso da função de onda (de acordo com a Interpretação de Copenhague, adotada nesta proposta), traduzido na perda da figura de difração.

A grande curiosidade do experimento da borracha quântica reside no fato de que, quando montado em sua forma completa, como visto na Figura 1.1, pode-se recuperar a figura de

interferência perdida com o auxílio do analisador, desde que este esteja disposto num ângulo de 45° em relação aos polarizadores do identificador de caminho (a descrição pormenorizada do funcionamento do experimento se dará no Capítulo 5). Dessa forma, com a borracha quântica pode-se não apenas discutir os princípios fundamentais da Mecânica Quântica, como várias outras consequências da teoria, além de discuti-los durante o experimento.

Porém, como discutido anteriormente, dentro do ensino de Física atual, parece haver uma dicotomia entre o clássico e o quântico. Assim, aos olhos deste trabalho, parece que uma boa forma de aproximar esses ramos é através do uso de analogias.

Diversos autores defendem o uso de analogias no ensino de Física. Jorge (1990, p. 196), argumenta que, ao estabelecer uma analogia, o estudante compara o conhecimento que pretende adquirir com outro já presente em seu domínio. Zambon e Terrazzan (2013), consideram que um aprendiz pode utilizar-se das analogias para conectar um novo conhecimento a outro que já possuía. Os autores ainda elencam os resultados positivos de ao menos oito pesquisas que tinham como foco o ensino através de analogias. Entretanto, nem sempre o uso de analogias pode gerar o resultado esperado, como constataram Souza et al. (2006), ao conduzirem um estudo sobre os modelos atômicos de Thomson e Bohr com alunos do 1º ano do Ensino Médio. O estudo, segundo os autores, mostrou que a maioria dos alunos não entendeu as analogias propostas.

No entanto, existe um intenso debate sobre a melhor maneira de introduzir conceitos de FMC no ambiente escolar. A *Escola da Espanha* (GIL et al., 1988), defende que um tratamento simplista sobre tópicos de FMC em sala de aula pode gerar concepções alternativas. A *Escola de Berlim* (FISCHLER; LICHTFELDT, 1992) não recomenda o uso de analogias clássicas para o tratamento de conceitos de FMC na educação básica. E a *Escola Americana* (ARONS, 1990; TERRAZZAN, 1994) propõe o enxugamento de temas de FMC no ensino de Física. No entanto, a Escola Americana vê a Física Clássica como um meio interessante para se abordar tópicos de FMC, contrariamente ao que prediz a Escola de Berlim.

Independentemente da perspectiva que se analise, é de suma importância levar em consideração o conceito da transposição didática (CHEVALLARD, 1991) para a abordagem de tópicos de FMC em nível médio. Chevallard trata da distância e das modificações sofridas por um saber entre a sua concepção e sua inserção na sala de aula. Para ele, um conceito, quando transposto, passa por severas modificações, mas mantém semelhanças com a ideia original, por adquirir significados próprios do ambiente escolar. Dessa forma, espera que os saberes no contexto do ensino não sejam meras simplificações dos saberes iniciais, mas sim novos saberes

capazes de responder ao domínio da ciência e da sala de aula. Porém, muitas vezes essas simplificações são necessárias, pois entre outros motivos, os objetivos dos saberes são diferentes e, além disso, fatores como a disponibilidade de tempo dos estudantes, seus objetivos e sua maturidade precisam ser levados em consideração.

O referencial teórico escolhido para referenciar o presente projeto de mestrado profissional foi a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2003, apud MOREIRA, 2014). Ausubel argumenta que o estudante só consegue assimilar aquelas informações que possuam algum significado para si. Para isso, ele deve conectar aquela nova informação à algum outro conhecimento preexistente em sua estrutura cognitiva (ou seja, quando o indivíduo possui subsunçores relacionados àquele tema). Além disso, o aluno deve estar disposto a receber esse novo conhecimento. Quando essas condições são satisfeitas, pode ocorrer o que Ausubel chamou de aprendizagem significativa, e aquele novo conhecimento pode ser dito potencialmente significativo. Por outro lado, quando a informação é armazenada de modo arbitrário, acontece a chamada aprendizagem mecânica, que é a falta de interação desse conhecimento com algum outro presente na estrutura cognitiva do estudante, e que deve ser evitada. No entanto, em não havendo subsunçores, a aprendizagem pode começar de forma mecânica, e depois ir aumentando, até tornar-se significativa.

Nesse trabalho, partir-se-á da premissa que o uso de analogias para o ensino de tópicos de FMC, mais especificamente dos conceitos gerais da Mecânica Quântica, pode vir a ser um mecanismo de apoio a uma aprendizagem significativa por parte do estudante, desde que cuidados sejam tomados para se evitar que uma ferramenta de auxílio se torne mais um empecilho no processo ensino-aprendizagem.

O objetivo do produto educacional resultante deste trabalho, um texto de apoio ao professor de Física, integrante da série do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da UFRGS, é proporcionar ao professor de Física do Ensino Médio a possibilidade de explorar, junto a seus alunos, um dos mais fascinantes assuntos da Física atual: a Mecânica Quântica. Esse ramo da FMC possui conceitos próprios que, muitas vezes, além de não intuitivos, são extremamente abstratos e de difícil compreensão, tanto para alunos quanto para os próprios professores. Assim, entende-se que o experimento da borracha quântica, aqui proposto, é uma boa ferramenta para facilitar o entendimento de tais conceitos. Todavia, a maior intenção deste projeto é oportunizar aos estudantes o contato com alguns conceitos básicos da Mecânica Quântica, através das sequências didáticas e ferramentas virtuais que aqui serão indicadas. Não se pretende, nem se espera, que os alunos assimilem por completo tudo o que

com eles for compartilhado, mas sim que os mesmos possam despertar suas consciências para a importância – e a beleza – da nova Física que lhes será apresentada. Além disso, pretende-se investigar se os assuntos aqui tratados podem ser considerados, na visão de Ausubel, potencialmente significativos.

Assim, o Capítulo 2 trará uma pequena revisão da literatura sobre os pressupostos básicos desta proposta educacional, como o fomento à articulação de tópicos de FMC no Ensino Médio e as relações entre as Físicas Clássica e Quântica através do uso de analogias. O Capítulo 3 apresentará os referenciais teóricos de Ausubel e Chevallard, aqui adotados. O Capítulo 4 discutirá a metodologia e contextualizará a aplicação do projeto. Já o Capítulo 5 narrará todos os encontros realizados, bem como descreverá as atividades neles desenvolvidas. O Capítulo 6 discutirá os resultados obtidos pelos alunos nos testes a eles propostos. Por fim, O Capítulo 7 trará as considerações finais, onde serão ressaltados os principais ensinamentos colhidos. O produto educacional, resultante deste trabalho, encontra-se no Apêndice G.

2. ESTUDOS RELACIONADOS

Este capítulo destina-se a discutir as obras da literatura que serviram de base ao presente trabalho. Para tanto, serão abordados, na sequência, alguns trabalhos que estimulam a inserção da FMC no ensino básico, as relações que podem ser estabelecidas entre os modelos das Físicas Clássica e Quântica, as analogias possíveis entre esses dois modelos e, por fim, um breve resumo a respeito dos documentos oficiais da Educação no Brasil.

2.1 A FMC no Ensino Básico

Apesar de o desenvolvimento das ideias acerca da Mecânica Quântica terem ocorrido desde o início do século XX, foi apenas no final da década de 1970 que surgiram os primeiros estudos a respeito da introdução de tópicos de FMC nos currículos escolares. Encontros como a “Conferência sobre o Ensino em Física Moderna”, ocorrido no Fermilab (EUA), em 1986, também fomentaram a necessidade de atualização dos currículos (OSTERMANN; MOREIRA, 2000). O principal objetivo de tais encontros era promover a inserção de tópicos de Física de partículas e cosmologia no ensino básico da época, além de despertar a curiosidade dos estudantes, atualizando-os a respeito das inovações proporcionadas pela nova Física que naquele momento se desenhava. Além do mais, se o compartilhamento dessas inovações não acabasse por alavancar a formação de novos pesquisadores, pelo menos iria dar a oportunidade de os estudantes compreenderem conceitos que cientistas e pesquisadores corriqueiramente tratavam nos meios de comunicação da época. Ao ter esse tipo de contato, o estudante teria a ciência mais perto de si, uma vez que seria testemunha dos avanços e descobertas científicas do seu cotidiano.

A fim de descrever o cenário do ensino de Física da época, Aubrecht¹, (1989, apud OSTERMANN e MOREIRA, 2000) assim coloca um ponto para discussão:

¹ AUBRECHT, G. J. Redesigning courses and textbooks for the twenty-first century. *American Journal of Physics*, v. 57(4), p. 352-359, 1989.

[...] se um físico do século XIX fosse solicitado a ensinar física em um nível introdutório usando um texto atual, ele o faria sem grandes dificuldades. Mas se este mesmo físico tentasse ler **Physical Review Letters** ou **Physical Review** ou falar sobre pesquisas atuais de Física, isto seria impossível para ele (p.25).

Essa realidade disponível aos estudantes da época era desmotivadora, sob o ponto de vista do ensino de ciências. Enquanto eram confrontados com jornais, revistas e programas de televisão que tratavam sobre relatividade, cosmologia, física de partículas e outros assuntos ligados à FMC, os estudantes encontravam na escola apenas cinemática, óptica, termologia e eletromagnetismo. Já o professor que tentava abordar tópicos de FMC em sua aula não podia recorrer a uma fonte que fosse adequada ao seu domínio conceitual, visto que os periódicos científicos não eram (e ainda não são) compatíveis com os níveis didáticos exigidos pelo ensino básico (CHEVALLARD, 1991).

Alguns autores criticam os currículos escolares adotados desde então, seja por serem demasiadamente longos, seja pela falta de conteúdos de FMC. Pesquisas de Gil et al. (1988), Terrazzan (1992) e Ostermann e Moreira (2000) vão nesse sentido.

Em contrapartida a esse cenário, várias propostas passaram a defender uma maior inserção da FMC nos livros didáticos, currículos e, como consequência, na sala de aula. Greca et al. (2001) argumentam que um número cada vez maior de pesquisas é realizado nesse sentido devido à extrema importância da FMC na atualidade, em especial a Mecânica Quântica, a nova vertente da Física nos séculos XX e XXI, que dá sustentação às físicas nuclear, molecular e de partículas. Tais pesquisas ressaltam a relevância do assunto perante os próprios jovens, muitas vezes interessados em discutir, na sala de aula, questões como buracos negros, aceleradores de partículas e outros assuntos de seu cotidiano, relacionados à FMC. Segundo Greca et al. (2001),

[...] os desenvolvimentos recentes na miniaturização eletrônica e na nanotecnologia têm introduzido, até no mundo dos negócios, dispositivos que somente podem ser apreciados a partir dos princípios da Mecânica Quântica. Se até agora este conhecimento estava reservado aos estudantes de Física e de Química, parece inevitável que a maioria dos profissionais deste novo século deva ter um conhecimento a este respeito bem mais aprofundado que o necessário até então (p. 444).

2.2 Relações entre o clássico e o quântico

Então, se é dever fomentar o ensino da FMC no Ensino Médio, qual a melhor maneira de fazê-lo? Uma boa proposta é apresentada por Ricci et al. (2007), ao tentar estabelecer uma

conexão entre o clássico e o quântico, utilizando o interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ), um arranjo experimental mais moderno que recria o famoso experimento da dupla fenda proposto por Thomas Young, em meados de 1800, que demonstrou a natureza ondulatória da luz. Segundo os próprios autores,

[...] ressaltamos que o IMZ em regime clássico pode servir como excelente ponto de partida para a discussão da dualidade onda-partícula na FQ², graças ao fato de que perguntas tais como “por qual braço rumou o fóton?” são mais naturalmente provocadas por esse arranjo (p. 80).

Assim como Ricci et al. (2007), acredita-se que criar conexões entre o clássico e o quântico pode ser uma boa forma de atingir os objetivos de aprendizagem propostos, sendo essa uma das propostas da presente dissertação.

Pereira et al. (2012) propõem uma discussão baseada na reformulação dos postulados da Mecânica Quântica, onde a abordagem matemática foi substituída pela abordagem operacional, com o objetivo de simplificar o entendimento dos mesmos pelos estudantes do Ensino Médio, já que estes não dispõem do arcabouço matemático necessário à compreensão total da teoria. Segundo os autores, o principal objetivo da proposta é

[...] após uma discussão qualitativa sobre esses postulados e os conceitos principais neles envolvidos, fornecer uma espécie de "tradução" do formalismo quântico como uma proposta no sentido de introduzir o assunto com uma linguagem mais apropriada para os professores do Ensino Médio, na qual os postulados são apresentados em uma base conceitual e fenomenológica. A partir dessa discussão, espera-se que os professores se sintam mais encorajados a elaborar formas de transpô-la para a sala de aula (p. 833).

Da mesma maneira, Silva e Júnior (2014) expõem, em seu artigo, como Arthur Compton partiu de uma abordagem semiclássica a uma abordagem quântica na explicação do efeito Compton. Mais uma vez, fica evidente que estabelecer relações entre o clássico e o quântico parece ser uma boa maneira de diminuir a distância entre essas duas visões da Física, além de mostrar para o estudante que a Física da qual fazem parte é uma só. Outra perspectiva interessante de ensino é tomar uma abordagem histórica da evolução dos conceitos da Física. Silva e Júnior (2014), mais uma vez, o fazem ao discutir a descoberta do efeito Compton sob uma perspectiva histórica, mostrando detalhadamente todo o desenvolvimento do conceito elaborado por Compton:

² Física Quântica.

[...] O que também deve ser destacado na história da ciência é o fato de que Compton, antes de chegar à explicação do efeito Compton, quântico, também abordou o problema semiclassicamente em 1921. Ou seja, o programa de investigação do nosso personagem passou por diferentes fases e conjecturas até a sua formulação quântica. Neste sentido, a nossa análise revela de que forma Compton modificou o seu programa de pesquisa, indo da teoria semiclássica à quântica (p. 1601-2).

A adoção desta abordagem histórica vai ao encontro da ideia de que a Física não é feita de meros conceitos concebidos ao acaso, mas sim fruto de muita pesquisa, de inúmeras tentativas e erros, de uma construção e moldagem que se dão ao longo dos séculos e que, principalmente, está em constante processo de modificação. Esse enfoque propicia ao aluno vislumbrar que a Física é feita de modelos: uma ideia sobre determinado fenômeno nasce a partir da discussão, proposição, teste e adaptação de um modelo científico. Podemos ter vários modelos que expliquem determinado fato; sobreviverá aquele que melhor se adaptar à realidade, até que um novo seja proposto e desbanque o anterior (KUHN, 2001; MOREIRA e MASSONI, 2011).

2.3 Uso de analogias no Ensino de Física

Diante do discutido até o momento, percebe-se haver uma aparente dicotomia entre o clássico e o quântico, e na visão deste trabalho, parece que a melhor forma de aproximação desses ramos é através do uso de analogias.

Segundo Jorge (1990, p. 196), “Analogia é um processo comparativo de fenômenos diferentes através de suas semelhanças”. Nesse sentido, o estudante compara o conhecimento que pretende adquirir com outro já presente em seu domínio. Esse processo pode contribuir para que o novo conceito encontre uma conexão em outro já presente no arcabouço intelectual do sujeito, respeitando-se, obviamente, as diferenças entre ambos, mas ressaltando seus pontos comuns, o que pode vir a dar um maior significado a esse novo conhecimento.

O uso de analogias no ensino de Física é ainda defendido por Zambon e Terrazzan (2013), os quais consideram que um aprendiz pode utilizar-se das analogias para conectar um novo conhecimento a outro que já possuía. Segundo os autores,

[...] uma das formas de explicar a aquisição/construção de conhecimento, segundo uma visão construtivista, é aquela que sugere que uma aprendizagem efetiva ocorre quando o aprendiz atribui significado ao conhecimento ensinado. Para atribuir esse significado, o aprendiz precisa encontrar ou criar conexões entre a nova informação e o conhecimento já existente. Um dos modos de efetivar esse processo é realizá-lo por mediação ao uso de analogias.

Em sua pesquisa, realizada com 50 alunos do 2º ano do Ensino Médio sobre o tema energia interna, “a grande maioria dos estudantes conseguiu estabelecer efetivamente relações analógicas entre o análogo proposto e o conceito alvo” (ZAMBON; TERRAZZAN, 2013, p. 7). Os autores ainda comentam, em seu artigo, os resultados positivos de pelo menos oito pesquisas que tinham como foco o ensino através de analogias.

Já Souza et al. (2006) aplicaram um questionário sobre os modelos atômicos de Thomson e Bohr a 99 alunos do 1º ano do Ensino Médio. Os modelos atômicos são temas especiais em termos de analogias, pois famosos são o modelo do pudim de passas de Thomson e o modelo planetário do átomo de Bohr. O estudo, segundo os autores, mostrou que a maioria dos alunos não entendeu as analogias propostas e, como consequência, o que os modelos propunham.

Estes resultados alertam para o fato de que o uso de analogias nem sempre pode surtir o efeito desejado, ora por serem inadequadas para o público alvo, ora por tentarem se ancorar a conhecimentos não tão bem enraizados no domínio dos alunos. Assim, entende-se também que não se pode fazer um uso indiscriminado de analogias, sob pena de o estudante não compreender o que se está tentando ensinar. Segundo os autores, as analogias têm de ser compatíveis com o nível intelectual e perfil social do público alvo. Os autores findam seu artigo fazendo uma crítica ao uso das analogias dos modelos atômicos propostos em sua pesquisa, concluindo que as mesmas não são bons modelos de ensino.

Em linhas gerais, o debate sobre a melhor maneira de introduzir conceitos de FMC no Ensino Médio é ainda uma discussão em aberto na literatura. A *Escola da Espanha*, cujas principais ideias estão resumidas em Gil et al. (1988), defende que a maneira simplista como a exploração dos limites clássicos é tratada no Ensino Médio pode gerar, por exemplo, concepções alternativas, dificultando uma posterior mudança conceitual (MORTIMER, 1996; MOREIRA e GRECA, 2003). A *Escola de Berlim*, discutida entre outros por Fischler e Lichtfeldt (1992), não recomenda o uso de analogias clássicas para o tratamento de conceitos de FMC na educação básica, indo na contramão desta proposta de ensino. E uma terceira maneira de tratar o problema é resumida nas ideias da *Escola Americana* (ARONS, 1990; mas ver também TERRAZZAN, 1994), que propõe o enxugamento de temas de FMC na educação básica. No entanto, contrariamente à Escola de Berlim, a Escola Americana vê na Física Clássica uma abordagem interessante de tópicos da FMC. Para uma revisão detalhada do tema sugerimos a leitura de Ostermann e Moreira (2000).

Assim, esta proposta educacional entende que o uso de analogias para o ensino de Física, particularmente para o tratamento de conceitos de Mecânica Quântica através de análogos clássicos, pode vir a ser um mecanismo de apoio a uma aprendizagem significativa por parte do estudante, atendendo o referencial teórico adotado, desde que cuidados sejam tomados para se evitar que uma ferramenta de auxílio se torne mais um empecilho no processo ensino-aprendizagem.

2.4 Os documentos oficiais da Educação no Brasil

Os documentos oficiais da Educação no Brasil deixam clara a necessidade de uma maior inserção de conteúdos de FMC em sala de aula. A Lei de Diretrizes Básicas da Educação (BRASIL, 1996) classifica o Ensino Médio como sendo a porção final da Educação Básica, e que o mesmo tem como finalidades a preparação para o trabalho, a aprendizagem continuada, a formação ética, o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico, entre outros. Para que esses objetivos sejam atingidos, entende-se ser necessária uma maior participação dos conteúdos de FMC nos currículos de Física do Ensino Médio. Do mesmo modo, os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 1999) e as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002), além das Orientações Curriculares para o Ensino Médio (BRASIL, 2006) e das Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, contidas nas Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais da Educação Básica (BRASIL, 2013), reforçam essas recomendações em relação à introdução da FMC. Confirmando essa tendência, recomendações explícitas nesse sentido foram introduzidas nos editais do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) de 2012 e 2015 (BRASIL, 2011; 2014), provocando a entrada definitiva desses conteúdos nos livros do Ensino Médio, de modo diferente do que tratava o edital do Programa Nacional do Livro para o Ensino Médio (PNLEM) de 2009, que não trazia nenhuma obrigação quanto à FMC.

Atualmente, encontra-se em discussão no Ministério da Educação uma proposta para a formação de uma Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2016), cujo objetivo é construir, em cada área do conhecimento, uma espécie de currículo básico a ser seguido em todo o país. Esse processo de atualização dos currículos escolares é recorrente na educação brasileira, principalmente a partir da década de 1990. Especificamente para o componente curricular Física, a proposta está dividida em seis Unidades de Conhecimento (UCF), das quais duas estão diretamente relacionadas à FMC. A UC5F trata da “Matéria e radiação em sistemas e processos naturais e tecnológicos”, e a UC6F, de “Terra, Universo e vida”. Julgando que devem ser

visitadas duas UCF por ano letivo do EM, então pode-se concluir que, pela proposta atual, os conteúdos de Física Moderna serão contemplados com um ano letivo completo. Caso confirmada essa proposta, talvez se tenha a mudança curricular mais profunda da história da educação brasileira (do componente curricular Física), e um avanço significativo da FMC em termos curriculares, vindo ao encontro das aspirações de grande parte dos pesquisadores da área do Ensino de Física no Brasil.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo serão apresentados os referenciais teóricos que embasaram este trabalho. Inicialmente discutir-se-á a os conceitos que formaram a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2003, apud MOREIRA, 2014), bem como suas implicações sobre as atividades pensadas neste projeto. A seguir, serão tecidos comentários a respeito da teoria da transposição didática, proposta por Chevallard (1991), considerada fundamental para o tratamento adequado dos conceitos aqui estudados.

3.1 A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel

David P. Ausubel (1918-2008) foi um psiquiatra norte-americano que centrou sua teoria de educação no conceito de *aprendizagem significativa*. Apesar de pertencer à medicina, foi à psicologia educacional que dedicou a maior parte de sua carreira, e onde obteve mais destaque (ver, por exemplo, MOREIRA, 2014).

Segundo Ausubel, todo conhecimento é, por definição, *significativo*. O indivíduo, no aspecto cognitivo, só consegue reter para si informações que façam algum sentido ou que possuam algum significado. Além disso, essa informação só é retida de forma eficiente se puder ser conectada a algum outro conhecimento preexistente.

Ausubel diferencia três tipos principais de aprendizagem. A primeira delas é chamada *aprendizagem cognitiva*, terreno no qual construiu sua teoria. Ela é o resultado da forma ordenada com que as informações se organizam na mente de uma pessoa, a qual chamou estrutura cognitiva. Outro tipo, a *aprendizagem afetiva* resulta de experiências do sujeito com o mundo exterior, tais como prazer, dor, satisfação, tristeza ou alegria, podendo ou não estar atrelada à aprendizagem cognitiva. Por fim, a *aprendizagem psicomotora* decorre de respostas musculares oriundas de treino e prática. Ressalta-se que mesmo essas habilidades psicomotoras necessitam da parte cognitiva para uma boa aprendizagem. De uma maneira geral, pode-se afirmar que a aprendizagem cognitiva sempre se faz presente. Sendo um cognitivista por

convicção, Ausubel comunga com Piaget e Vergnaud a respeito da importância da afetividade e da estrutura cognitiva do indivíduo.

De acordo com Ausubel, em sala de aula, o fator decisivo para que ocorra a aprendizagem depende do que o estudante já conhece. O conceito de aprendizagem significativa pressupõe que uma nova informação só fará realmente sentido se puder ser ancorada a outra que já faça parte do arcabouço cognitivo do sujeito. Essa “bagagem intelectual” foi chamada por Ausubel de *conceito subsunçor* ou simplesmente *subsunçor*. Já que, aos olhos deste trabalho, a teoria de Ausubel permite a utilização de analogias, uma vez que compara uma informação nova à outra já presente na estrutura cognitiva do sujeito, será feita aqui uma analogia entre o conceito de subsunçor de Ausubel e um recife de corais. O coral é um animal marinho que precisa de um meio material, normalmente uma rocha, para poder se fixar e ali viver, já que não pode se alimentar, crescer ou se reproduzir vivendo livremente ao sabor das correntes. Assim também é o novo conhecimento que se pretende que o aluno assimile. Esse conhecimento só vai fazer algum sentido se puder ser ligado a algum conceito ou proposição relevante, preexistente na estrutura cognitiva do aprendiz. Logo, essa estrutura é, por natureza, hierarquizada, onde conceitos mais antigos têm, mesmo que inconscientemente, mais valor do que os mais recentes, pois estão mais bem arraigados.

Ainda sobre a aprendizagem significativa, Ausubel propõe que pode ocorrer de três maneiras: *representacional*, *de conceitos* e *proposicional*. A representacional, que é a forma mais básica e da qual as demais dependem, trabalha com a relação entre símbolos, objetos ou conceitos, e seus respectivos significados. Em suma, é uma atribuição de significado entre um símbolo e um *referente* (objeto, evento ou conceito). A aprendizagem de conceitos é, em última análise, uma forma de aprendizagem representacional, pois os conceitos também podem ser representados por símbolos, com a diferença que os conceitos são genéricos e representam regularidades em eventos ou objetos. Por fim, a aprendizagem proposicional dá a noção de que o aluno aprende o significado de ideias em forma de proposições, ao invés do significado de palavras isoladas. Ou seja, a combinação dessas palavras constitui uma proposição, que representa um conceito. Moreira (2014, p. 165), a respeito da aprendizagem proposicional, argumenta que “a tarefa é aprender o significado que está além da soma dos significados das palavras ou conceitos que compõem a proposição”. Um bom exemplo de aprendizagem proposicional são as equações que a Física utiliza para descrever os diversos fenômenos que são observados.

Em oposição ao conceito de aprendizagem significativa, Ausubel também define o conceito de *aprendizagem mecânica*, que é a falta de interação do novo conhecimento com algum já existente. Dessa forma, uma nova informação é armazenada de modo arbitrário, sem nenhuma ligação com algum subsunçor particular. A não interação entre esses conhecimentos pode resultar na falta de significação do novo conhecimento para o sujeito. Na visão dele, esse tipo de aprendizagem deve ser evitado. Tem-se, como exemplo de aprendizagem mecânica, a memorização de fórmulas, leis ou pares de sílabas sem sentido (processos mnemônicos). Todavia, Ausubel entende também que a aprendizagem mecânica é necessária quando pode ser entendida como uma continuação da significativa, no sentido de que, em algum momento, o aluno vai se deparar com alguma informação nova que ainda não habita sua estrutura cognitiva. Nesse caso, a aprendizagem mecânica deve acontecer até que um novo subsunçor seja criado, e a ele possam ser incrementadas novas ideias, tornando-o mais completo e sofisticado com o tempo. Fazendo novamente uma analogia aos corais, é como se fosse introduzido no mar um “recife artificial”. Se em determinado local do leito marinho existe apenas areia, ao lá se depositar qualquer estrutura rígida, de metal ou rocha, ou até mesmo um navio naufragado, com o tempo os corais ali se fixarão, dando origem a belas e complexas estruturas de vida marinha. Algo semelhante, segundo Ausubel, acontece na estrutura cognitiva do indivíduo. A aprendizagem mecânica é o recife, que dá origem a novos subsunçores, aos quais se ligarão novos conhecimentos. Com o tempo, esses subsunçores ficam mais elaborados, e são cada vez mais capazes de servir de âncora a novas informações. Assim, de uma forma geral, Ausubel entende que a aprendizagem mecânica deve ocorrer sempre que não houver associações, dentro da estrutura cognitiva do aprendiz, entre um novo conceito e um subsunçor correspondente. O indesejável, segundo Ausubel, é que a aprendizagem mecânica ocorra frequentemente, como se fosse a “regra” da aprendizagem.

Quanto à formação de novos conceitos, Ausubel prevê que podem ocorrer de três maneiras distintas: por *assimilação*, *diferenciação progressiva* ou *reconciliação integrativa*.

O processo de assimilação, que também é considerado uma teoria por Ausubel, ocorre quando uma nova informação, potencialmente significativa, é assimilada sob um subsunçor mais inclusivo, já presente na estrutura cognitiva do sujeito. Dessa forma, a interação do subsunçor com a nova informação provoca a modificação de ambos. Ele ainda chama esse processo de ancoragem, já que, na sua perspectiva, auxilia a retenção dessa informação por parte do aprendiz. Esse processo também é dito *subordinado*, pois a nova informação se atrela ao subsunçor preexistente, criando uma estrutura naturalmente hierarquizada.

Quando a modificação do conceito subsunçor acontece com certa frequência, ocorre o que Ausubel chama de diferenciação progressiva deste conceito. Esse processo de aprendizagem ocorre basicamente de forma subordinada, e é levado em consideração ao se montar os conteúdos programáticos de ensino, onde conceitos mais inclusivos são apresentados inicialmente, sendo progressivamente diferenciados para os mais específicos. Essa ideia se justificativa pelo fato de que, na mente de um indivíduo, os conceitos mais gerais e inclusivos situam-se no topo, enquanto que os menos inclusivos e mais diferenciados atrelam-se abaixo destes, de forma hierárquica.

De outro modo, quando o aprendiz relaciona ideias adquiridas com aquelas estabelecidas em sua estrutura cognitiva, os elementos presentes em sua estrutura cognitiva se reorganizam e passam a ter novos significados. A este processo Ausubel chamou de reconciliação integrativa. A relação entre as ideias pode apontar semelhanças e diferenças importantes, de forma que o indivíduo pode reconciliar as desconexões. A reconciliação integrativa ocorre, normalmente, sob as formas de aprendizagem *superordenada* ou *combinatória*. A aprendizagem superordenada acontece quando um novo conceito, normalmente muito geral e amplo, é incorporado à estrutura cognitiva do indivíduo, e passa a assimilar ideias ou conceitos preexistentes. Ou seja, é o inverso da aprendizagem subordinada. Já a aprendizagem combinatória agrega proposições e conceitos que não estabelecem uma relação de subordinação ou superordenação entre si. Elas são de conteúdo amplo, sendo relacionáveis à estrutura cognitiva como um todo.

No entanto, de acordo com Ausubel, para que a aprendizagem significativa ocorra, outras condições devem ser satisfeitas. Uma delas é que o estudante incorpore à sua estrutura cognitiva o conhecimento de um modo que não seja arbitrário ou literal. Quando isso acontece, esse conhecimento é dito *potencialmente significativo*, desde que o aprendiz disponha de subsunçores, e possa ligá-lo a esses subsunçores específicos que já possua. Outra condição, talvez a mais importante do processo, é descrita como a *disposição* do estudante a aprender o que se pretende ensinar. Não basta que tudo o que foi descrito até aqui aconteça; se o indivíduo se sentir “obrigado” a reter aquele conhecimento, ou seja, não tiver a intenção de que a informação seja assimilada de forma significativa, então simplesmente vai acabar por decorar aquilo, e a aprendizagem será meramente mecânica. O aluno precisa reconhecer a significância daquele conhecimento para poder tomá-lo para si de forma significativa.

Esse, talvez seja o papel principal do professor em sala de aula: despertar o aluno para que reconheça a relevância daquilo que pretende ensinar. E para isso deve identificar o que o

aluno já sabe e ensiná-lo de acordo. E o aluno, por sua vez, deve estar disposto a tomar posse daquele conhecimento. Se todos esses fatores convergirem, a aprendizagem, que é o foco e o objetivo principal de todo o processo de sala de aula, pode acontecer. E de maneira significativa.

Assim, este trabalho assume que uma aprendizagem significativa é desejável frente à aprendizagem mecânica, ou seja, aquele conceito que se deseja que o aluno aprenda tem que vir carregado de algum significado para ele. Além disso, em se tratando de Mecânica Quântica, cujos conceitos por vezes não são nada óbvios ou intuitivos, é importante que os estudantes estabeleçam relações com algum conhecimento preexistente, no sentido de ancorar uma nova informação a outra que já seja de seu domínio. Baseado nesse contexto, o uso de analogias parece bastante apropriado para o ensino de tópicos de FMC no Ensino Médio.

De acordo com a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, o estudante tem uma tendência maior de aprender quando se sente estimulado por um material considerado potencialmente significativo. Esse material deve ter significado lógico e compatível ao nível educacional em que o estudante se encontra. Já o aluno, por sua vez, deve dispor de subsunçores mínimos para atribuir-lhe significado. Assim, espera-se que o aluno, baseado no experimento da borracha quântica aqui proposto, além dos textos de apoio, desenvolva uma compreensão mínima, porém ampla, dos conceitos mais importantes e interessantes que cercam a Mecânica Quântica, e dessa forma possa perceber que as tecnologias que o cercam, quase que na sua totalidade, têm seus princípios fundamentados nos conceitos estudados nesta proposta.

3.2 O conceito de transposição didática de Yves Chevallard

O conceito da *transposição didática* foi proposto inicialmente pelo sociólogo Michel Verret, em 1975. Entretanto, em 1991 ganhou o status de teoria, com o matemático Yves Chevallard. A Transposição Didática é um conceito que trata da distância e das modificações sofridas por um saber entre a sua concepção e sua inserção na sala de aula, dentro dos diversos níveis de ensino (que pode ser o superior, ou médio, ou fundamental). Brockington e Pietrocola (2005) e Slovinski (2012) defendem que a teoria da transposição didática pode ser uma importante aliada na articulação de tópicos de FMC na educação básica, particularmente no Ensino Médio.

Chevallard (1991) classifica os saberes em três níveis básicos, assim descritos: O *Saber Sábio*, concebido sob os pilares das ciências por cientistas e pesquisadores, o *Saber a Ensinar*, que é a materialização do Saber Sábio (em forma de livros didáticos, por exemplo), e o *Saber Ensinado*, que é a maneira como o Saber Sábio se apresenta aos estudantes na sala de aula. A

análise de como se dá a transformação de um conceito dentro dos níveis dos saberes é o foco do trabalho de Chevallard. Para ele, um conceito, quando transferido, passa por severas modificações, mas mantém semelhanças com a ideia original, apesar de adquirir significados próprios do ambiente escolar. Assim, Chevallard espera que os saberes no contexto do ensino não sejam meras simplificações dos saberes iniciais, mas sim novos saberes capazes de responder aos domínios tanto da ciência como da sala de aula. Entretanto, por vezes essas simplificações se fazem necessárias por diversos motivos: cada saber tem objetivos próprios, e características próprias, como disponibilidade, tempo e maturidade dos públicos-alvo.

Chevallard (1991) descreveu os três níveis dos saberes dentro do que chamou de *esferas do saber*. Uma breve descrição de cada esfera é apresentada a seguir.

O Saber Sábido é aquele cujos conceitos são concebidos por cientistas, pesquisadores e colaboradores de uma área de conhecimento, nos mais diversos locais de trabalho (centros, institutos e laboratórios de pesquisa). Após sua concepção, esses conceitos são então publicados em periódicos científicos e revistas especializadas, e apresentados em congressos e seminários específicos da área. Assim, esses conceitos são inicialmente absorvidos pela sociedade especializada daquela área de conhecimento, pois suas especificidades e particularidades são intrínsecas àquela comunidade.

Já o Saber a Ensinar é o resultado de uma *transposição* de algum conceito do Saber Sábido para o ambiente escolar de algum nível do ensino, além da materialização desse conceito em alguma forma de publicação. Essa transposição dá ao Saber a Ensinar um *caráter didático*, e este apresenta-se na forma de livros didáticos e publicações, cuja finalidade é oferecer subsídios ao ensino. Os conceitos presentes nesses livros são determinados por uma série de interesses políticos e econômicos, os quais são influenciados principalmente por especialistas em educação, professores, editoras, governo e a sociedade, cada qual com seu nível de influência.

Por fim, o Saber Ensinado é aquele baseado nos livros didáticos e programas educacionais, mas moldado pela dinâmica da sala de aula. As interações entre professor e aluno acabam por modificar o Saber a Ensinar, vindo a ocorrer uma nova transposição dos conceitos, e dando origem ao Saber Ensinado, que é carregado de um didatismo próprio, necessário e facilitador da compreensão pelos estudantes. Ou seja, o conceito constante nos livros didáticos não é exatamente o conceito que estará presente na estrutura cognitiva do indivíduo. O estudante dará um significado próprio àquele conceito, e esse significado dependerá principalmente dos conceitos anteriormente presentes em sua estrutura cognitiva, segundo a

teoria da aprendizagem significativa de Ausubel. Assim, de acordo com essa interpretação, o Saber Ensinado, resultado de duas transposições desde o Saber Sábio, será diferente para cada aluno, pois diferentes são suas estruturas cognitivas.

Chevallard (1991) ainda classifica o ambiente escolar como sendo o *Sistema Didático*, estando ele inserido num ambiente mais amplo, o qual denominou *Sistema de Ensino*, cujo domínio pertence à sociedade. Se o conjunto de escolas de uma cidade é o Sistema de Ensino, então cada escola é um Sistema Didático isolado, por exemplo. As interações dinâmicas entre a sociedade e o Sistema de Ensino dão origem ao que Chevallard denominou *noosfera*. É na noosfera que se dá a transformação dos saberes, sempre mediados por interesses já citados. O encontro desses interesses gera um grande conflito, pois no mesmo ambiente encontramos pesquisadores, professores, estudantes, pais, políticos, autores, cada qual impondo ou lutando pelo seu espaço. Assim, é na noosfera que os agentes pertencentes a diversos grupos sociais, com valores e regras próprias, moldam os saberes segundo melhor lhes convém, e de acordo com seus interesses políticos, comerciais, acadêmicos e pedagógicos.

Segundo Chevallard, o processo da transposição didática acaba por modificar profundamente a relação binária entre professor e aluno dentro da sala de aula. Esse ambiente ganha a presença do Saber, e as relações deste com os outros entes formam uma tríade, dando origem a novos aspectos epistemológicos e afetivos.

Chevallard também discute a dinâmica da transposição didática. É de seu interesse entender as condições que possibilitam a transposição de um saber, além de compreender os processos que definem se esse saber permanecerá ativo no Sistema de Ensino, que é regido pela noosfera. A seguir são apresentadas as principais características que um conceito deve possuir para que a transposição didática possa acontecer.

A primeira característica que um conceito deve possuir para que possa ser transposto do Saber Sábio para o Saber a Ensinar é a *consensualidade*. É fundamental que não haja dúvidas da veracidade, ainda que momentânea do conceito a ser transposto, perante a maioria dos pesquisadores de determinada área. Isso explica em parte os extensos currículos de Física Clássica, já há muito consagrados, em detrimento às muitas novidades da FMC, que apenas há pouco passaram a povoar timidamente tais currículos.

Outra característica considerada importante por Chevallard é a *atualidade*, dividida em dois segmentos distintos. A *atualidade moral* é a importância que sociedade, via noosfera, atribui a determinado conceito, refletindo diretamente nos currículos escolares. Por outro lado, a *atualidade biológica* denota a importância e a atualidade daquele conceito frente à

comunidade especializada da área. Modelos considerados desatualizados, como o calórico, o éter ou os modelos atômicos de Bohr e Rutherford não possuem atualidade biológica e, portanto, não deveriam constar dos currículos escolares. No entanto, se utilizados como introdução a modelos que possuam atualidade biológica, dentro de uma perspectiva histórica, podem propiciar boas condições para a aprendizagem, uma vez que auxiliarão o estudante a entender tal conceito, além de facilitar a compreensão de como se dá a construção do pensamento científico e a evolução dos conceitos da ciência.

A *operacionalidade* é a propriedade na qual um conceito tem a capacidade de gerar exercícios e outras formas de avaliação. Essas ferramentas dão a medida da possibilidade de transposição de um conceito perante os estudantes, uma vez que é através dos exercícios, principalmente, que estes têm contato mais íntimo com o conceito estudado. Uma boa operacionalidade significa boas formas de avaliação. Mais uma vez, pode-se verificar através dessa característica o porquê dos currículos escolares do Ensino Médio estarem carregados de conceitos da Física Clássica: por utilizarem ferramentas matemáticas acessíveis aos alunos, seus conceitos geram uma infinidade de exercícios e formas de avaliação, diferentemente da FMC, que utiliza uma matemática muito mais aprofundada para sua descrição. Um conceito com baixa operacionalidade não atrai tanto o interesse dos alunos, fazendo com que o nível de operacionalidade esteja diretamente atrelado à possibilidade de transposição de um conceito.

Já a *criatividade didática* é a característica que denota a capacidade de um conceito criar uma identidade própria dentro do ambiente escolar. Essa identidade pode assumir importâncias diferentes dentro das esferas do saber. Um bom exemplo são os conceitos tratados na cinemática. Graças a um processo de transposição didática bem-sucedido, a cinemática é amplamente difundida e tratada no ensino básico, povoando de maneira expressiva os currículos escolares, apesar de não mais haver pesquisas sobre ela no campo científico. Como seu modelo é bem recebido pelos físicos em geral, poucos se interessam em testar tal modelo, na tentativa de refutá-lo. Assim, a criatividade didática é uma das principais características que um conceito deve possuir para que possa ser transposto.

A última característica trazida por Chevallard é a *terapêutica*. Ela é a comprovação de que um conceito foi transposto e aceito. Segundo Chevallard, é no ambiente escolar que se tem a prova do sucesso da transposição didática. Assim, se a transposição ocorre, é a sala de aula que vai informar sobre a validade daquele conceito no contexto escolar. Em outras palavras, é a experiência que vai definir a sobrevivência ou não de um conceito.

Esse conjunto de características propostas por Chevallard dá a dimensão do que é necessário para que um conhecimento seja transposto do Saber Sábido, passando pelo Saber a Ensinar, e desembocando no Saber Ensinado, de maneira eficaz.

Este trabalho pretende aliar a ideia da transposição didática de Chevallard à teoria de aprendizagem significativa de Ausubel. Entende-se, aqui, que ambas as teorias são necessárias e fundamentais à articulação de tópicos de FMC, mais especificamente sobre os princípios da Mecânica Quântica, no Ensino Médio. A transposição didática dos conceitos de Mecânica Quântica se faz necessária para que estes se adequem ao nível intelectual do aluno, que dentro da sua estrutura cognitiva, deve dar algum significado a esse novo conhecimento, se possível conectando-o a algum conhecimento preexistente. E espera-se que essa conexão seja facilitada pelo uso de analogias.

4. METODOLOGIA E CONTEXTO DE APLICAÇÃO DO PROJETO

4.1 Contextualização do espaço didático

O projeto aqui apresentado foi aplicado no Colégio Militar de Porto Alegre, instituição histórica e centenária de ensino público, fundada em 1912, que abriga aproximadamente 1.000 alunos de ambos os sexos (sendo 45% meninas), distribuídos no Ensino Fundamental (a partir do 6º Ano) e no Ensino Médio. O Colégio Militar de Porto Alegre, e outros doze colégios militares, distribuídos nas cinco regiões brasileiras, constituem o Sistema Colégio Militar do Brasil (SCMB), que é subordinado ao Ministério da Defesa e gerido pelo Exército Brasileiro. Apesar de sua denominação, os alunos não são militares, como se poderia pensar. Na verdade, os alunos são classificados como sendo de origem militar (caso ao menos um de seus responsáveis seja militar das Forças Armadas ou da Polícia Militar) ou de origem civil. Os alunos de origem civil ingressam no Colégio Militar mediante concurso público realizado anualmente, e os de origem militar têm seu ingresso regulado por legislação própria do Exército Brasileiro. Entretanto, todos os alunos são submetidos a um conjunto de regras que, aliado ao uso obrigatório do uniforme, diferencia-os dos alunos das demais instituições de ensino do país. Esse conjunto de regras³ com as quais os responsáveis declaram concordar no momento da matrícula, é que dá o caráter dito militar ao Sistema Didático escolhido para a aplicação do projeto.

O Colégio Militar é mantido basicamente com verbas do Exército e contribuições mensais dos responsáveis, chamada Quota Mensal Escolar (QME). Em seus quadros, possui por volta de 120 professores, sendo aproximadamente 65% professores civis e 35% professores militares. Do total de docentes, cerca de 60% são doutores ou mestres. Sua proposta pedagógica busca a educação em tempo integral, que deverá ser posta em prática, de modo gradual, a partir de 2017 para o 6º Ano do Ensino Fundamental. Até então, as aulas ocorrem na parte da manhã,

³ Disponível em: <http://www.cmpa.tche.br/component/phocadownload/category/462-2017?download=850:manual-do-aluno-2017-atualizado>. Acesso em: 16 março 2017.

de segunda à sexta, das 07h30min às 12h40min, e em alguns sábados, no mesmo horário, a fim de cumprir a carga de 200 dias letivos, conforme prevê a legislação. Os objetivos principais desta proposta pedagógica são: proporcionar uma base sólida de conteúdos disciplinares, preparar o jovem para a vida cidadã, forjando valores morais e afetivos de ordem, disciplina e respeito, num clima de sadia amizade e sã camaradagem. Percebe-se aqui a forte influência positivista, característica presente desde o nascimento da instituição.

Desde 2016, o Colégio Militar adota um novo calendário e metodologia de avaliação. O ano letivo passou a ser dividido em três trimestres (anteriormente eram quatro bimestres). Já as avaliações formais são divididas em Avaliações Parciais (AP), que ocorrem durante o desenrolar do trimestre, em número variável (de 1 a 3), conforme a disciplina e o ano, e em Avaliações de Estudo (AE), que verificam o aprendizado como um todo, ao fim do trimestre. Caso o aluno não atinja a nota mínima (5,0) numa AP qualquer, passa a frequentar imediatamente as aulas de recuperação, que ocorrem na parte da tarde. Ou seja, essa recuperação se dá ao longo do trimestre, e não após o mesmo. O objetivo de tal metodologia é tentar identificar possíveis dificuldades de aprendizagem com a maior celeridade possível, e iniciar a correção desses problemas de maneira imediata. Com isso, espera-se que o aluno com dificuldades de aprendizagem chegue ao final do ano em condições de ser aprovado.

O prédio onde funciona o Colégio Militar de Porto Alegre faz parte do patrimônio histórico da cidade de Porto Alegre desde sua fundação, em 1872. Desta data até 1912, e no período entre 1939 e 1961, ali funcionaram outras escolas militares voltadas à formação militar, onde passaram figuras históricas para o Exército e para o país, como o Marechal José Antônio Corrêa da Câmara (redator da Lei Áurea), o Capitão João José Pereira Parobé, professor da então Escola Militar do RS, fundador do Colégio Júlio de Castilhos, e que junto com outros cinco tenentes professores da Escola, fundaram em 1896 a Escola de Engenharia, precursora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Além desses, destaca-se também que pelas arcadas do Colégio Militar passaram vários Presidentes da República, como Getúlio Vargas e os Generais Gaspar Dutra, Castelo Branco, Costa e Silva, Médici, Geisel e Figueiredo. Assim, o Colégio Militar também é conhecido como “Colégio dos Presidentes”.

Quanto às instalações do Colégio, atualmente possui cerca de 40 salas de aula, que comportam entre 25 e 35 alunos. Todas as salas possuem quadro (negro ou branco), ventiladores, computador, projetor, além de mesas e cadeiras em boas condições para alunos e professor. Há um projeto para instalar ar condicionado em todas as salas em breve. Todas as salas possuem boa ventilação, pois as janelas são voltadas para a rua. Além disso, o Colégio

possui três salas multimídia, com a mesma capacidade das salas comuns, que disponibilizam um computador por aluno. Também há laboratórios de Química, Biologia, Matemática e Física, onde neste último desenvolveram-se as atividades do presente projeto. As instalações ainda comportam uma biblioteca, um salão com capacidade para 300 pessoas, e para o ano de 2017 está previsto o início do funcionamento de uma sala de recursos especiais para alunos portadores de necessidades especiais. Além de toda essa infraestrutura, o Colégio ainda possui um observatório, na região do Morro Santa Teresa, que foi construído em 2002 em parceria com a UFRGS, USP e Fundação Vitae. Dotado de um telescópio robótico, o observatório é empregado nas aulas, em demonstrações didáticas, e também nas atividades do Clube de Física e no treinamento dos alunos para as diversas olimpíadas das áreas afins.



Figura 4.1: laboratório de Física do Colégio Militar de Porto Alegre. FONTE: o autor.

O laboratório de Física, local de aplicação do projeto, ocupa uma sala da arcada leste do Colégio. A sala dos professores fica no piso superior, e no inferior se desenrolam as atividades com a participação dos alunos. Estes são divididos em seis mesas com seis cadeiras cada, perfazendo a capacidade de 36 alunos. O laboratório possui um quadro negro, sobre o qual é sobreposto um outro, branco. Ainda possui um computador e um projetor. O material dos experimentos fica acondicionado ao fundo da sala, em armários embutidos com porta de vidro, que facilita sua visualização. A sala é um tanto acanhada, de maneira que o professor precisa utilizar alguma das mesas dos alunos para realizar algum procedimento ou demonstração. Além disso, o laboratório sofre há algum tempo com infiltrações, chegando quase ao ponto de ser interditado.

4.2 Contexto de aplicação do projeto

O projeto foi inicialmente pensado para contemplar os alunos dos 2º e 3º anos do Ensino Médio, que voluntariamente frequentam os encontros do Clube de Física do Colégio Militar. Os encontros ocorreriam semanalmente, no turno da tarde, utilizando tanto a sala de aula quanto o laboratório de Física. Esse público alvo foi escolhido porque entendia-se que esses estudantes já têm presente em sua estrutura cognitiva o subsunçor referente aos fenômenos ondulatórios, ponto de partida da discussão que se propunha. Como Ausubel prega que o fator decisivo para a aprendizagem significativa depende do que o sujeito já conhece, entendia-se que os fenômenos quânticos explicitados pelo experimento da borracha quântica poderiam melhor se ancorar nesse e em outros subsunçores, que se esperava os estudantes já possuíssem. O fato de se poder trabalhar com alunos voluntários vai ao encontro da outra condição proposta por Ausubel: a predisposição do aluno a aprender.

Entretanto, com o desenrolar do projeto, vivenciando o dia a dia dos alunos e devido a algumas demandas e imposições do Colégio, optou-se por estender o convite aos alunos do 1º Ano do Ensino Médio e do 9º Ano do Ensino Fundamental, já que é neste nível de ensino que os alunos têm o primeiro contato com a Física como disciplina regular. Mesmo abrindo mão de alguns pressupostos defendidos por Ausubel, os resultados colhidos foram interessantes e serão apresentados nos próximos capítulos.

Ciclo	Ano	Nº Alunos
Ensino Fundamental	9º	2
	1º	4
Ensino Médio	2º	1
	3º	29
	Total	36

Tabela 4.1: distribuição dos alunos por ano de ensino. FONTE: o autor.

Dessa forma, ao todo se inscreveram 42 alunos, do 9º Ano do Ensino Fundamental ao 3º Ano do Ensino Médio que, após algumas desistências nas primeiras aulas, se fixaram em 36 alunos efetivos. Destes, 33 seguiram efetivamente até a realização do Teste Final. Os motivos que levaram à desistência desses 9 alunos podem ser resumidos basicamente em apenas um: a falta de tempo. Apesar de não adotar o turno integral, o Colégio Militar desenvolve diversas atividades paralelas voltadas aos alunos, na parte da tarde, envolvendo as áreas esportiva,

cultural e de ensino. Com isso, alguns alunos não conseguiram conciliar essas diversas atividades, todas de caráter voluntário, apesar do interesse apresentado no início do projeto, e tiveram que priorizar seus afazeres como melhor lhes convinha. Ainda ocorriam as aulas de recuperação do 3º trimestre, que como mencionado anteriormente, acontecem durante o desenrolar do próprio trimestre. Os 36 alunos efetivos do projeto eram distribuídos conforme mostra a tabela 4.1.

Outro contratempo enfrentado dizia respeito ao período de aplicação do projeto. Prevendo um encontro com a duração de duas horas-aula por semana, tinha-se a expectativa de aplicar o projeto em 45 dias. Contudo, verificou-se que por fatores que são peculiares ao Colégio Militar, as duas últimas semanas do projeto coincidiriam com o início do período de provas relativas ao 3º trimestre dos alunos do 3º Ano. Estes têm seu calendário diferenciado dos demais alunos para se adequar ao período de início dos vestibulares, além da própria Formatura do 3º Ano, evento peculiar do Colégio, que é revestido de toda uma simbologia e almejado por todos, o que implica no encerramento total das atividades escolares até o fim do mês de novembro. Assim, optou-se por realizar dois encontros semanais, com a duração de duas horas-aula cada. Ainda foi realizado um encontro extra, entre a segunda e terceira aulas, para recuperar os conteúdos perdidos por alguns alunos nos dois primeiros encontros, pois alguns alunos do 3º Ano precisavam comparecer às aulas de recuperação (por sinal, da disciplina de Física) no mesmo horário desses dois primeiros encontros.

Dessa forma, os encontros ocorreram entre 5 e 29 de setembro de 2016. Os critérios de avaliação adotados foram consonantes com os do Colégio, ou seja, nota mínima de 5,0 e comparecimento mínimo de 75% às aulas. Por se tratar de uma atividade voluntária, e com autorização do Coordenador da disciplina, cada aluno que concluiu o projeto teve computada para si uma nota extra de AP, de acordo com seu desempenho, o que ajudou muitos a melhorar seu grau dentro daquele trimestre. Ainda, como forma de exaltação e agradecimento, os alunos que atingiram os requisitos de nota e frequência foram contemplados com um diploma de conclusão, expedido pelo Colégio e assinado por seu Comandante. Para muitos alunos, foi o primeiro diploma de suas vidas.

4.3 Metodologia

O planejamento da sequência de encontros do projeto, apresentado a seguir, baseou-se em alguns aspectos discutidos com a coordenação da disciplina de Física do Colégio Militar de Porto Alegre. Apesar de bastante peculiar, o Colégio não se difere de outras instituições de

ensino similares, principalmente no tocante à composição dos currículos escolares do 3º Ano do Ensino Médio, público para o qual este trabalho se destina, tendo em vista que conteúdos de FMC normalmente são ministrados nessa porção do Ensino Médio. É notória a grande quantidade de temas presentes nos currículos, frente à pequena carga horária disponível para a disciplina. Some-se ainda a isso a necessidade de revisão de conteúdos passados, a fim de enfrentar as provas de ingresso no Ensino Superior, e o cenário torna-se ainda mais desafiador. Dessa forma, o planejamento curricular procurou contemplar os conteúdos mínimos entendidos como necessários à compreensão dos fenômenos verificados no experimento da borracha quântica, levando em consideração os pressupostos citados no referencial teórico. O Quadro 4.2 apresenta um resumo dos conceitos clássicos e quânticos tratados em cada encontro.

Encontro	Tema	Principais conceitos trabalhados em aula	
		Mecânica Clássica	Mecânica Quântica
1	Contextualização histórica e bases do surgimento da Mecânica Quântica no século XX	Teoria corpuscular da luz Teoria ondulatória da luz	Radiação do corpo negro Quantização da energia de Planck
2	Discussões a respeito da luz: onda ou partícula?	Ondas e suas propriedades Teoria corpuscular de Newton Teoria ondulatória de Huygens	Efeito fotoelétrico
3	A Mecânica Quântica: principais conceitos e curiosidades	-	Dualidade onda-partícula Efeito Compton Ondas de matéria Princípio da incerteza
4	A borracha quântica: discussão e apresentação do experimento	-	Mecânica quântica: função de onda, estado, superposição de estados, probabilidade, medição, colapso da função de onda
5	Contextualização do mundo quântico que nos rodeia	-	Tunelamento quântico Emaranhamento quântico Computação quântica Supercondutividade

Quadro 4.2: resumo dos conceitos clássicos e quânticos tratados em cada encontro. FONTE: o autor.

A metodologia utilizada em cada encontro foi baseada nos pressupostos de Ausubel, discutidos no referencial teórico. Partiu-se da premissa que os alunos tinham a intenção de aprender aquilo que se pretendia ensinar. Com isso, tentou-se mapear quais subsunções clássicas encontravam-se ou não presentes na estrutura cognitiva dos estudantes através de um teste inicial. Uma vez identificados, esses subsunções serviram de ancoragem para os novos

conceitos tratados em cada encontro. O planejamento dos conteúdos foi pensado de modo a permitir que os estudantes estruturassem os novos conceitos por assimilação, uma vez que se imagina que o novo subsunçor acaba por modificar o preexistente, ocorrendo também a reconciliação integrativa, pois os elementos presentes em sua estrutura cognitiva vão se reorganizar e passar a ter novos significados (MOREIRA, 2014). Desse modo, cada encontro fazia uma conexão com a aula anterior antes que novos conteúdos fossem abordados. A fim de tentar dar significado aos novos conteúdos, os estudantes eram constantemente convidados a se expressar de maneira verbal sobre aquilo que se estava ensinando. As simulações computacionais e os experimentos reais utilizados corroboraram essa estratégia.

Assim, a aplicação do projeto, que para os alunos foi chamado de “Oficina sobre os princípios da Mecânica Quântica”, ocorreu entre os dias 5 e 29 de setembro de 2016, no laboratório de Física do Colégio Militar de Porto Alegre, entre 14h00min e 16h00min. Via de regra, as aulas foram divididas em duas partes, havendo um pequeno intervalo entre elas. Para as aulas de 1 a 4, foi desenvolvido um pequeno guia (Apêndices A-D), previamente distribuído, onde os estudantes puderam anotar os temas que consideraram mais relevantes. O roteiro das aulas, baseado no planejamento realizado, está sintetizado na sequência.

Primeiro encontro

O projeto iniciou com a aplicação de um teste inicial (Apêndice E), na primeira hora de aula, cujo objetivo era prospectar quais subsunçores aqui estudados estavam, mesmo que minimamente, presentes na estrutura cognitiva dos alunos. Tentou-se verificar se os alunos diferenciavam fenômenos ondulatórios de fenômenos corpusculares, se os alunos sabiam identificar proporções, as maneiras como eles estudavam e raciocinavam ao resolver questões de Física, como imaginavam ser o átomo e, por fim, qual era seu conhecimento sobre qualquer aspecto da Mecânica Quântica. Esses dados foram armazenados para posterior processamento e comparação.

Na segunda metade da aula foram expostos os propósitos e objetivos do projeto, e apresentados os temas que seriam discutidos em cada encontro. A seguir, partiu-se para uma contextualização histórica da Física, dentro dos seus diversos ramos conhecidos até meados do século XX, dando ênfase aos temas que não eram consensuais dentro da esfera do Saber Sábio, mais particularmente a respeito da natureza da luz. Deu-se ênfase no fracasso do eletromagnetismo clássico ao tentar explicar a radiação do corpo negro, e a solução de Max

Planck e suas implicações para a Física da época. Ainda foi apresentada uma simulação⁴ computacional para se tentar explicar no que consiste a emissão e absorção de fótons pelos átomos.

Segundo encontro

No segundo encontro, o objetivo principal foi apresentar alguns conceitos da Mecânica Clássica que podem oferecer algum tipo de analogia com os da Mecânica Quântica, dando ênfase aos fenômenos ondulatórios e corpusculares. Para tanto, retomou-se a contextualização histórica dos fenômenos ondulatórios, seguido da explicação das suas principais propriedades, como reflexão, refração, difração, interferência e polarização. Aqui foi desenvolvida uma discussão que apresentava, ao mesmo tempo, atividades experimentais numa cuba d'água e simulações computacionais projetadas no quadro, a fim de mostrar aos alunos que simulações computacionais podem ser confiáveis. A primeira parte da aula findou com nova abordagem às discussões históricas a respeito da natureza da luz, com uma consensualidade momentânea em relação à teoria ondulatória.

Na segunda parte da aula, nova abordagem histórica trouxe à tona os dois fatos que foram determinantes para o surgimento da Mecânica Quântica: a quantização da energia de Max Planck e a proposta não clássica de Albert Einstein para o efeito fotoelétrico. Aqui, novamente, o entendimento do efeito fotoelétrico foi facilitado pelo uso de uma simulação computacional. Assim os alunos, que até então dividiam-se entre opiniões ondulatórias ou corpusculares sobre a natureza da luz, foram defrontados com a dualidade onda-partícula. Esse é o ponto final dessa aula, e o ponto de partida do próximo encontro.

Terceiro encontro

Nessa terceira aula, inicialmente foi feita uma pequena revisão do que foi discutido até ali, a fim de situar novamente os alunos dentro do contexto que se pretende estudar, e que levou à constatação de que a luz apresenta propriedades análogas às ondulatórias e corpusculares, dependendo do tipo de exame que se faça. A fim de corroborar tal teoria, foram apresentadas as contribuições de Arthur Compton, que demonstrou que um fóton pode se comportar como uma partícula, a ideia de simetria de Louis de Broglie, que sugeriu que uma partícula pode ter um comprimento de onda associado, e a comprovação das ondas de matéria, pelo experimento

⁴ Uma discussão pormenorizada de todas as simulações computacionais empregadas nesta proposta educacional pode ser encontrada na seção 5.7.

de Davisson-Germer (com o auxílio de uma simulação computacional). Para fins de compreensão das grandezas implicadas na teoria, foram apresentados exemplos de como a dualidade onda-partícula se manifesta. A primeira parte da aula se encerrou com uma simulação computacional sobre o experimento de dupla fenda com partículas, que ajuda a corroborar a teoria das ondas de matéria.

A segunda parte da aula começou a tratar do princípio da incerteza de Heisenberg, apresentando argumentos semiclássicos e matemáticos. A matemática trouxe constatações que causaram certa perplexidade em alguns alunos, como a impossibilidade de uma partícula quântica ter velocidade ou energia nulas. Uma nova visão do modelo atômico foi apresentada através de uma simulação computacional, na qual também foi feita uma revisão histórica dos modelos historicamente adotados. A aula prosseguiu com uma pequena introdução aos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, na visão da Escola de Copenhague. Os princípios tratados foram a função de onda e sua interpretação, estado, medição e superposição de estados. Por fim, a simulação do experimento da dupla fenda com partículas foi revisitada, a fim de demonstrar esses princípios ora apresentados. A aula se encerrou com a exibição de um vídeo sobre princípios fundamentais da Mecânica Quântica.

Quarto encontro

O quarto encontro foi destinado à apresentação do experimento da borracha quântica aos alunos. Mas ele só se deu na segunda parte da aula, pois antes ainda havia um caminho a percorrer até lá. No início do encontro, como de costume, foi feita uma retomada dos conteúdos visitados em aulas anteriores, sempre com o objetivo de trazer a atenção do aluno para aquele momento do estudo. Foram revisados os conceitos de dualidade onda-partícula e do princípio da incerteza de Heisenberg. Em seguida, foram estudados com maior profundidade os princípios fundamentais da Mecânica Quântica. Tratou-se separadamente dos conceitos de função de onda, estado quântico, interpretação matemática e física da função de onda, superposição de estados, o problema da medição e o colapso da função de onda, sempre levando em consideração a interpretação de Copenhague. A fim de ilustrar esse novo cenário da Física, foi utilizada a analogia criada por Erwin Schrödinger, que tinha esse mesmo problema ao tentar explicar sua descrição para a Mecânica Quântica. O gato de Schrödinger causou bastante espanto e desconforto a alguns alunos, que não se deixavam convencer pela nova Física que lhes era oferecida. A primeira parte da aula encerrou-se com mais uma visita à simulação

computacional do experimento da dupla fenda com partículas, a fim de reforçar esses novos conhecimentos, e na tentativa de demover os alunos ainda descrentes.

A segunda parte da aula iniciou com a apresentação de um vídeo, cujo objetivo foi mais uma vez reforçar as novas ideias na estrutura cognitiva dos alunos, a fim de obter uma aprendizagem significativa. A seguir, finalmente foi apresentado o experimento da borracha quântica. Inicialmente realizou-se a descrição do experimento, bem como a função de seus componentes, principalmente dos polarizadores. Durante a apresentação do experimento, puderam ser explorados todos os conceitos fundamentais da Mecânica Quântica, além de outros efeitos inusitados, como o restabelecimento da função de onda original. Apesar desse fenômeno não ser previsto pela teoria quântica, houve a explicação de que a borracha quântica se tratava de um experimento clássico, sendo seu resultado previsto pelo eletromagnetismo clássico, e servindo desta forma como mais uma analogia para o entendimento do quântico pelo clássico, proposta central desta proposta educacional. O experimento permitiu mais que mais uma vez se reforçasse esses conhecimentos na mente dos alunos, a fim de tentar transformar uma aprendizagem mecânica inicial numa aprendizagem significativa. A explicação pormenorizada do funcionamento do experimento da borracha quântica se dará no próximo capítulo, e também no Produto Educacional (Apêndice G).

Quinto encontro

O quinto encontro destinou-se a mostrar a atualidade da Mecânica Quântica. Como de costume, a aula iniciou com uma revisão do encontro anterior, com nova exposição dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica através da analogia do gato de Schrödinger. O experimento da borracha quântica foi revisitado, com a apresentação das figuras de interferência obtidas nos diversos arranjos experimentais propostos. Essas figuras foram comparadas às obtidas por Hillmer e Kwiat (2007) e, guardadas as devidas proporções, se aproximaram bastante daquelas, convencendo os alunos da eficácia do experimento. A seguir, foram abordadas tecnologias possibilitadas pela Mecânica Quântica, a começar pelo tunelamento quântico. Após uma breve explanação sobre o assunto, foi apresentada uma simulação computacional sobre o tema, com o objetivo de torná-lo mais claro aos alunos. Um pequeno vídeo explicando o princípio de funcionamento do microscópio de varredura por tunelamento (STM) também foi utilizado, seguido de imagens obtidas pelo mesmo.

A segunda parte da aula tratou inicialmente do conceito de emaranhamento quântico, seguido do paradoxo EPR⁵ e das discussões por ele provocadas, e da solução proposta pelo teorema de Bell. Os alunos foram novamente confrontados com ideias diametralmente opostas, e levados a uma discussão sobre a validade da teoria quântica. Foram abordadas na sequência aplicações da teoria, como computadores quânticos, criptografia e teletransporte. Outra tecnologia tratada foi a supercondutividade. Além de uma explicação sumária sobre o fenômeno, foram relatadas as diversas aplicações da tecnologia, como sua utilização na medicina, no transporte e em outras áreas. A levitação magnética foi um ponto de grande interesse por parte dos alunos. A aula foi encerrada com um alerta sobre a má utilização dos princípios quânticos, no intuito de empregá-los como teoria base para a criação de moto-perpétuos quânticos e outras máquinas mágicas, ou então na área da medicina, com a já famosa “cura quântica”.

Sexto encontro

O sexto e último encontro destinou-se apenas à aplicação de um teste final, onde se buscou verificar quais temas mais atraíram a atenção dos alunos. Eles foram convidados a responder questões sobre as teorias a respeito da natureza da luz, os fatos que contribuíram para o surgimento da Mecânica Quântica, a dualidade onda-partícula, o princípio da incerteza de Heisenberg e os princípios fundamentais da Mecânica Quântica. Os alunos ainda foram requisitados a novamente representar um átomo, e a expressar quais eram suas ideias a respeito da Mecânica Quântica agora, ao fim do curso. Ainda puderam eleger qual tema foi considerado o mais interessante, além de argumentar se a oficina foi, de algum modo, útil na sua formação. Esses dados foram novamente armazenados e posteriormente comparados aos obtidos no Teste Inicial, onde buscou-se verificar se ocorreram indícios de alterações nas concepções originais dos alunos a respeito dos temas abordados neste projeto.

⁵ O paradoxo EPR foi assim denominado em homenagem à Albert Einstein, Boris Podolsky, e Nathan Rosen, que o propuseram em 1935 como contraponto à Teoria Quântica que se estabelecia à época.

5. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES E NARRATIVA DE APLICAÇÃO DA PROPOSTA DIDÁTICA

O objetivo deste capítulo é narrar as atividades que foram desenvolvidas durante a aplicação do projeto, de uma maneira mais ampla e aprofundada, trazendo à tona alguns aspectos que chamaram a atenção, principalmente no tocante ao processo de ensino-aprendizagem. Aqui também serão apresentadas as práticas de ensino adotadas no decorrer das aulas, bem como compartilhadas as experiências vivenciadas naquela proposta. Por fim, na Seção 5.7, serão apresentadas as simulações computacionais utilizadas no desenrolar do projeto, e que serviram para ilustrar, exemplificar e enriquecer as aulas, sempre no intuito de permitir aos alunos uma melhor percepção, principalmente visual, dos fenômenos que estavam sendo descritos, em sua grande maioria de natureza quântica, e que naturalmente não condiziam com o senso comum dos estudantes, como poderá ser percebido. O Quadro 5.1 resume os temas abordados em cada encontro, bem como o experimento associado ao fenômeno discutido, caso haja. Além disso, buscou-se também elencar as principais analogias empregadas em cada encontro.

Encontro	Mecânica Clássica (MC)		Analogias	Mecânica Quântica (MQ)	
	Conceitos	Experimentos		Conceitos	Experimentos
1	Teoria corpuscular da luz	-	A luz como partícula (MC)	Radiação do corpo negro	Espectro de emissão de um corpo negro (EV ⁶)
	Teoria ondulatória da luz	-	A luz como onda (MC)	Quantização da energia de Planck	Emissão / absorção de energia por átomos (EV)
(Continua na próxima página)					

⁶ EV: Experimento virtual; ER: Experimento real.

Encontro	Mecânica Clássica (MC)		Analogias	Mecânica Quântica (MQ)	
	Conceitos	Experimentos		Conceitos	Experimentos
2	Ondas e suas propriedades	Reflexão, refração, difração, interferência (ER, EV) e polarização (ER) da luz	Ondas eletromagnéticas X Ondas na superfície de um líquido e numa corda (MC)	Efeito fotoelétrico	Efeito fotoelétrico (EV)
	Teoria corpuscular de Newton	-			
	Teoria ondulatória de Huygens	Dupla-fenda de Young (EV)			
3	-	-	O fotón como partícula (MQ)	Dualidade onda-partícula	Experimento de dupla-fenda c/ partículas (EV)
				Efeito Compton	-
			A partícula como onda (MQ)	Ondas de matéria	Experimento de Davisson-Germer (EV)
				Princípio da incerteza	Experimento sobre modelos do átomo de H (EV)
4	-	-	Gato de Schrödinger (MQ)	Mecânica Quântica: função de onda, estado, superposição de estados, probabilidade, medição, colapso da função de onda	Experimento de dupla-fenda c/ partículas (EV)
				Experimento da borracha quântica (ER)	
5	-	-	Poço de potencial finito X Energia potencial gravitacional (MQ)	Tunelamento quântico	Tunelamento quântico (EV)
				Emaranhamento quântico	-
				Supercondutividade	-

Quadro 5.1: resumo dos conceitos, experimentos e analogias tratados em cada encontro. FONTE: o autor.

5.1. Primeiro Encontro – Contextualização histórica e bases do surgimento da Mecânica Quântica no século XX

O primeiro encontro, ocorrido no dia 5 de setembro de 2016, iniciou com a aplicação de um teste inicial, na primeira hora de aula, com a finalidade de mapear os possíveis subsunçores presentes na estrutura cognitiva dos alunos, e cujos resultados serão comentados no próximo capítulo.

Na segunda metade da aula foram expostos os propósitos e objetivos do projeto, e apresentados os temas que seriam discutidos em cada encontro. Dentro de um contexto histórico, o panorama da Física no final do século XIX foi exibido nas áreas da Mecânica Newtoniana, da Termodinâmica e seus diversos colaboradores (Joule, Kelvin, Maxwell e outros), e da Óptica (comentário sobre as equações de Maxwell). Com exceção das equações de Maxwell, os alunos não se surpreenderam com o que foi apresentado, uma vez que a maioria já tinha tido algum contato com aquelas informações, ressalva feita aos alunos que ainda frequentavam o 9º e 1º anos. A seguir, tentou-se contextualizar historicamente as discussões que tentavam explicar a natureza da luz. Foi apresentada a teoria corpuscular, proposta inicialmente pelos gregos e defendida de maneira científica por Newton, seguida da teoria ondulatória, adotada principalmente por figuras como Huygens, Young e Maxwell. Perguntados sobre qual teoria defendiam, alguns alunos se posicionaram em favor da teoria corpuscular, principalmente os dos anos iniciais. A maioria dos alunos, no entanto, se mostrou adepta à teoria ondulatória. Pressupõe-se que isso ocorreu porque a maioria da turma era composta por alunos do 3º Ano, que já possuíam um subsunçor mínimo formado a respeito do tema, e que os alunos menos graduados ainda tinham uma visão ingênua de que a Física, como um todo, está muito atrelada à figura de Newton, vindo a entender como uma verdade absoluta toda sua obra e tudo a que ele é associado, o que não condiz com a Física do século XXI.

Os alunos foram então levados a constatação de que, à época, apenas a teoria ondulatória possuía atualidade biológica (CHEVALLARD, 1991), ou seja, era a ideia mais aceita. Com a supremacia momentânea dessa teoria, passou-se a apresentar algumas falhas da mesma, como a tentativa de elucidar a radiação emitida por um corpo negro. Foi preciso expor o conceito físico de corpo negro, visto que pouquíssimos alunos já tinham ouvido falar do tema (ressalta-se que alguns alunos eram frequentadores do Clube de Física do Colégio). Para facilitar a compreensão do conceito, foi utilizada uma simulação computacional (Seção 5.7.1) que permitia verificar como se dava a distribuição da intensidade de radiação de um corpo, numa determinada temperatura, em função dos seus diversos comprimentos de onda. Ou seja, a

simulação mostrava o espectro de emissão de um corpo negro, e também trazia exemplos de corpos negros. A fim de aprofundar a discussão, os alunos foram solicitados a preencher uma tabela constante do Guia da Aula 1 (Apêndice A), previamente distribuído, onde eram trazidos exemplos de corpos negros e sua temperatura absoluta. De posse da temperatura, os alunos deviam utilizar a simulação computacional para estimar seu comprimento de onda e indicar em qual faixa do espectro eletromagnético aquele corpo emitia a máxima radiação (pico de emissão). Após resolver alguns exemplos em sala, os alunos foram convidados a realizar o restante da tarefa em casa, já que o Guia da Aula 1 trazia, em seu fecho, o *link* da simulação.

A catástrofe do ultravioleta foi outro ponto que demandou um certo cuidado ao ser tratado, pois não havia um subsunçor estabelecido para o tópico. A solução proposta por Planck para explicar a radiação do corpo negro foi bem aceita pelos alunos. A quantização da energia demandou a utilização da segunda simulação computacional do projeto (Seção 5.7.2). O aplicativo escolhido foi um que simulava o comportamento de átomos de um gás rarefeito, encapsulados numa ampola, ao serem bombardeados por um feixe de elétrons. A simulação expôs visualmente o fenômeno da emissão de fótons por um átomo, e serviu de base para demonstrar aos alunos como se dava essa emissão. Foi possível tecer comentários a respeito da quantização da energia, que explica, por exemplo, os diferentes espectros de emissão de diferentes elementos químicos. A recepção da simulação pelos alunos foi considerada muito boa, pois houve grande participação dos mesmos, o que acabou por refletir num considerável tempo de discussão do fenômeno. Esse *feedback* positivo encorajou ainda mais a utilização de tais ferramentas nas aulas que se seguiram. A aula foi encerrada com a discussão das implicações da solução de Planck para a Física da época, deixando o assunto em aberto para ser retomado na aula seguinte.

5.2. Segundo Encontro – Discussões a respeito da luz: onda ou partícula?

O segundo encontro foi antecipado para o dia seguinte, 6 de setembro, em virtude da data prevista inicialmente, 7 de setembro, ser feriado, e de não haver aula prevista no calendário escolar no dia 8, uma vez que os alunos são liberados por terem participado do Desfile Cívico do Dia da Pátria. Essa foi a única oportunidade em que ocorreram encontros em dias seguidos. A primeira atividade desenvolvida foi a correção da tabela proposta na aula anterior, constante do Guia da Aula 1.

Nesse encontro, o objetivo principal foi apresentar alguns conceitos da Mecânica Clássica que podiam oferecer algum tipo de analogia com os da Mecânica Quântica, dando

ênfase aos fenômenos corpusculares e, principalmente, ondulatórios. A aula tinha ainda o objetivo de pavimentar o caminho para a abordagem do conceito da dualidade onda-partícula. Assim, a aula iniciou com uma discussão do porquê se achava que a luz se comportava como uma onda no século XIX. Foi introduzida uma discussão sobre o comportamento das ondas em um meio líquido, para posteriormente se fazer uma analogia com a luz. Foram, ainda, apresentadas as principais propriedades das ondas. Os fenômenos da reflexão, refração, difração e interferência foram abordados conceitualmente. Em seguida, foram apresentados visualmente, por meio de um experimento real numa cuba com água, e virtualmente, através de uma simulação computacional (Seção 5.7.3). A Figura 5.1 traz a projeção da imagem do fenômeno da interferência de ondas, produzida com o auxílio da cuba d'água e de um gerador de ondas, posicionados sobre um retroprojektor. A refração, difração e interferência foram os fenômenos que mais atraíram a atenção dos alunos, pois a visualização de seus efeitos era bastante interessante aos olhos deles. Esse interesse pôde ser verificado especialmente durante a demonstração realizada com os experimentos real e virtual. O outro fenômeno apresentado foi a polarização, demonstrada através de um experimento real com uma corda balançada de forma circular através de uma grade, que permitia a passagem das ondas apenas na direção paralela às grades.



Figura 5.1: interferência de ondas, produzida em uma cuba d'água posicionada sobre um retroprojektor. FONTE: o autor.

Após a parte experimental, foi retomada a discussão a respeito da natureza da luz, ocorrida nos séculos XVIII e XIX. Uma visão mais aprofundada dos motivos pelos quais Newton defendia o modelo corpuscular foi apresentada, bem como a argumentação de Huygens

para o modelo ondulatório, seguido do experimento de dupla-fenda de Young. A discussão se estendeu até Foucault, que na segunda metade do século XIX unificou a ideia em torno da teoria ondulatória, corroborada ainda pelas equações de Maxwell.

Com esse panorama, aliado às palavras de Lorde Kelvin, de que ao final do século XIX a Física era um céu azul com pequenas nuvens, foi exposto aos alunos um cenário que em breve seria completamente modificado. Essas modificações foram discutidas na segunda parte da aula.

A primeira grande revolução, provocada por Planck e a quantização da energia, foi relembrada e revista, já que havia sido exibida na aula anterior. A segunda grande revolução dizia respeito a uma teoria que justificasse o efeito fotoelétrico, cuja explicação era incompleta com a Física disponível na época, e que viria com as proposições de Einstein, sob a perspectiva de um comportamento corpuscular da luz. Aqui, a estratégia foi inicialmente introduzir o fenômeno físico aos alunos, uma vez que grande parte deles não sabia do que se tratava. Para isso, lançou-se mão, mais uma vez, de uma simulação computacional (Seção 5.7.4), a fim de explicar e, principalmente, ilustrar visualmente o efeito fotoelétrico, de modo que os alunos compreendessem do que se tratava o fenômeno. Tendo os alunos visualizado uma representação do fenômeno físico envolvido, foi a eles apresentada a visão da Física Clássica para a explicação do efeito fotoelétrico e suas limitações, como a emissão de elétrons não dependente da intensidade do feixe luminoso incidente e a existência de uma frequência de corte, por exemplo. A seguir, os argumentos de Einstein, baseados na ideia de quantização da energia de Planck, foram expostos, bem como o conceito de fóton. Com isso, aqueles problemas não sanados pela explicação clássica são corrigidos, e os alunos foram levados a crer que uma nova Física começa a se desenhar diante deles. A simulação computacional do efeito fotoelétrico auxiliou a exposição de toda essa sequência de ideias, sendo fundamental para o entendimento por parte dos alunos. Alguns deles já puderam compreender que as ideias de Einstein só faziam sentido se a luz fosse entendida como sendo composta de partículas. A descrição matemática proposta por Einstein também foi apresentada aos alunos, assim como alguns exemplos aplicados. Os alunos ainda foram convidados a preencher a tabela constante do Guia da Aula 2 (Apêndice B), que trata sobre aspectos relacionados ao efeito fotoelétrico.

No fim do encontro, com o objetivo de motivar os estudantes e prepará-los para o próximo encontro, os mesmos foram defrontados com duas visões antagônicas a respeito da natureza da luz. Na primeira parte da aula, foram levados a crer que a luz se comportava como uma onda. Na segunda metade, foi apresentada uma visão que só fazia sentido se a

entendêssemos como partícula. Baseados nesses dois pontos de vista, os alunos foram convidados a se posicionar sobre o tema. Com opiniões divididas entre comportamento como onda e partícula, a aula chegou ao seu ápice com a constatação de que a luz não é uma nem outra, mas sim apresenta uma combinação de características ora de onda, ora de partícula. Esse estranho e inesperado comportamento da luz aguçou o interesse dos estudantes, que deveriam esperar o próximo encontro para discutir mais profundamente esse e outros comportamentos estranhos da luz, e como descobrirão, também da matéria.

5.3. Terceiro Encontro – A Mecânica Quântica: principais conceitos e curiosidades

A terceira aula ocorreu no dia 15 de setembro, mais de uma semana após o segundo encontro. Antes, no dia 13, foi realizado um encontro extra para viabilizar a participação de doze alunos que, pelos motivos expostos no capítulo anterior, não puderam comparecer a alguma das aulas anteriores. Nesse encontro extra foram abordados todos os assuntos apresentados até aqui, de forma a deixar todos os alunos num mesmo patamar de ensino-aprendizagem.

Como havia decorrido algum tempo desde o segundo encontro, a retomada dos assuntos tratados anteriormente ocorreu com especial atenção, a fim de reconectar todos os alunos ao curso programado no projeto. Para tanto, foram revisitados os dois fenômenos que não eram explicados corretamente pela Física Clássica do final do século XIX. A radiação emitida por um corpo negro, na chamada catástrofe do ultravioleta, foi elucidada pela proposta da quantização da energia de Planck, e o efeito fotoelétrico, cuja verificação experimental diferia da previsão teórica da época, foi explicado por Einstein através de sua proposta da quantização da luz. Os alunos recordaram que, ao final da última aula, chegou-se à conclusão de que a luz não era explicada completamente por nenhuma das teorias (ondulatória e corpuscular), mas sim por uma combinação de ambas. Esse foi o ponto de partida para as novas discussões daquele encontro.

A fim de corroborar a ideia de que a luz se comporta como partícula, discutiu-se com os estudantes o experimento realizado por Compton, que levou ao resultado conhecido como “efeito Compton”. Esse experimento verificou que um fóton possui momentum linear, apesar de sua massa ser nula. Essa constatação gerou desconforto em boa parte dos alunos, que não aceitaram que isso fosse possível, uma vez que ia de encontro aos mais básicos conceitos da Mecânica Clássica, que ainda impregnavam suas mentes. Para tentar abrandar esse desconforto, lançou-se mão da teoria da relatividade restrita de Einstein (1905), sendo introduzido o conceito

de massa relativística (OSTERMANN e RICCI, 2004). A fim de ilustrar ainda mais essa estranha constatação, foi apresentada uma matéria publicada em uma conhecida revista⁷ sobre o protótipo de um veleiro solar, que utiliza o momentum linear da luz como forma de propulsão. Essa contextualização convenceu boa parte dos alunos. Ainda foi trazida a contribuição involuntária de Millikan, que tentou a todo custo provar que a ideia de quantização da luz de Einstein estava errada, e que, por fim, acabou auxiliando a comprovação da teoria. Aqui fez-se um pequeno parêntese para discutir com os alunos como pode se dar a evolução dos conceitos de uma determinada teoria, através da confirmação ou refutação desta teoria pela via experimental.

A seguir, foi apresentada a sugestão de Louis de Broglie, de que deveria haver simetria entre a luz e a matéria. A ideia de que uma partícula pode ter um comprimento de onda associado causou surpresa em grande parte dos alunos, haja vista a calorosa discussão que se seguiu, uma vez que os mesmos não conseguiam conceber tal coisa. A justificativa que convenceu os estudantes foi a apresentação do experimento de Davisson-Germer, através da difração de elétrons. A utilização de uma simulação computacional (Seção 5.7.5) que exibiu o experimento propiciou a visualização das franjas de interferência, forte indício de um comportamento ondulatório, e que corrobora o conceito de ondas de matéria de de Broglie. Exemplos matemáticos foram utilizados e confirmaram que partículas atômicas (elétrons), moléculas (fulereno, uma forma alotrópica do carbono) e corpos rígidos (bola de futebol) apresentam propriedades ondulatórias, mas devido à ordem de grandeza das grandezas envolvidas, apenas pequenas moléculas e partículas atômicas manifestam comportamento ondulatório detectável. Esses exemplos foram fundamentais para que os alunos começassem a estabelecer os limites práticos de validade da teoria quântica, principalmente no que diz respeito ao modo e onde os fenômenos quânticos podem se manifestar. Encerrando a primeira parte da aula, foi apresentada outra simulação computacional (Seção 5.7.6), que permite montar um aparato experimental semelhante ao da dupla-fenda de Young, utilizando radiação ou partículas. O feixe lançado sobre um obstáculo do tipo dupla-fenda, seja com fótons ou elétrons, produz uma figura de interferência sobre o anteparo. A simulação computacional, mais uma vez, corroborava aquilo que se estava estudando, no sentido de que permitia ao aluno evidenciar o caráter ondulatório da matéria, mais especificamente de partículas subatômicas e pequenas moléculas. Essa simulação, em especial, foi revisitada outras vezes ainda, pois à medida que se

⁷ Revista Época. Disponível em <http://colunas.revistaepoca.globo.com/planeta/2011/01/27/veleiro-solar-espacial-da-a-primeira-volta-em-torno-da-terra>. Acesso em 13/09/16.

aprofundava o conhecimento das particularidades da natureza quântica, poder-se-ia explorar todas as possibilidades dessa simulação, inclusive com o lançamento de uma única partícula ou fóton por vez, e que foi fundamental para discussões posteriores a respeito do funcionamento da Mecânica Quântica.

A segunda parte da aula trouxe o princípio da incerteza de Heisenberg. Alguns alunos relataram já ter estudado o princípio da incerteza nas aulas de Química, mas não souberam explicar do que se tratava exatamente, o que era um indício de uma aprendizagem mecânica que não evoluiu até tornar-se significativa (MOREIRA, 2014). Dois alunos do 3º Ano até conseguiram enunciar o princípio, mas não conseguiram explicar, mesmo que com suas palavras, o que aquilo significava. A falta de significado do conhecimento apresentado é outro indício de aprendizagem mecânica, mas percebeu-se, aqui, a oportunidade de dar sentido aos conhecimentos adquiridos de forma mecânica, e tal estratégia foi adotada.

Prosseguindo na aula, o princípio da incerteza foi abordado inicialmente no seu argumento semiclássico, e posteriormente através da expressão matemática que o define. Através da expressão matemática pode-se rapidamente chegar a duas conclusões que fogem completamente ao senso comum: a de que uma partícula quântica nunca pode estar parada, e, tendo velocidade não nula, existe uma energia mínima associada a ela, a chamada energia do ponto zero. Apesar de estranharem tais situações, que divergem completamente da Física Clássica, os argumentos matemáticos apresentados, de alguma forma, convenceram os estudantes. Outra implicação direta do princípio da incerteza diz respeito à necessidade da reformulação do modelo atômico adotado até então. Para isso, utilizou-se outra simulação computacional (Seção 5.7.7), que tratava sobre os modelos do átomo de hidrogênio. Essa simulação permitiu se fazer uma retomada histórica dos modelos atômicos adotados, partindo dos modelos clássicos da bola de bilhar de Dalton, do pudim de passas de Thomson e do sistema solar de Rutherford, passando pelo modelo semiclássico de Bohr, e chegando ao modelo que leva em consideração as constatações de natureza quântica de Heisenberg e de Broglie.

Encerrando a aula, iniciou-se uma abordagem superficial dos princípios fundamentais que regem a Mecânica Quântica, sob a ótica da interpretação de Copenhague. Os princípios tratados foram a função de onda e sua interpretação, estado, probabilidade, medição e superposição de estados. Essa abordagem inicial foi tentada para que se pudesse criar um ponto de conexão no próximo encontro, além de apresentar novamente a simulação computacional do experimento de dupla-fenda com partículas, com enfoque nesses princípios. A aula se encerrou

com a apresentação de um vídeo⁸, que trazia uma animação sobre o experimento da dupla-fenda com fótons e partículas. Esse vídeo tinha o objetivo de esclarecer as ideias contidas nos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, que seriam tratados insistentemente no próximo encontro, culminando com a apresentação do experimento da borracha quântica. Os alunos se mostraram bastante interessados no vídeo, uma vez que o mesmo possibilitou um melhor entendimento daqueles princípios então apresentados.

5.4. Quarto Encontro – A borracha quântica: discussão e apresentação do experimento

O quarto encontro aconteceu dia 22 de setembro, uma semana após o anterior, tendo em vista que o dia 20 de setembro, data inicialmente prevista, era feriado estadual. O encontro destinou-se principalmente à exposição do experimento da borracha quântica aos alunos, considerado o ápice deste projeto. Entretanto, o experimento só poderia ser apresentado após haver uma mínima compreensão dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica por parte dos alunos, o que se iniciou na aula anterior e foi intensificado naquele dia. A formação desse subsunçor é considerado fundamental para o sucesso do projeto, daí sua importância e tempo investido no seu desenvolvimento.

Como de praxe, o primeiro ato do encontro foi a revisão dos principais conceitos vistos nas aulas anteriores, e que de alguma forma seriam necessários nesse encontro. Essa estratégia, adotada sempre que possível no decorrer da aplicação do projeto, teve o objetivo de reforçar os subsunçores preexistentes ou recém-formados na estrutura cognitiva dos estudantes, através do processo de reconciliação integrativa (MOREIRA, 2014). Foram, então, lembrados os conceitos da dualidade onda-partícula, do fóton como partícula (Einstein e Compton), da partícula como onda (de Broglie), das ondas de matéria, do princípio da incerteza de Heisenberg, juntamente com as principais implicações práticas e teóricas dessas ideias. A participação dos alunos nessas revisões de início de aula foi considerada satisfatória, uma vez que sempre que eram solicitados a responder alguma indagação, faziam-no prontamente.

A seguir, partiu-se para um exame mais aprofundado dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica. Aqui cabe uma pequena discussão a respeito da estratégia de escolha desses princípios. Eles se baseiam integralmente nos postulados que regem a Mecânica Quântica, que por sua vez necessitam de um alto grau de conhecimento matemático para sua completa compreensão. Além disso, os postulados tratam de conceitos extremamente abstratos para o

⁸ Dr. Quantum – fenda dupla. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=zKiCEU6P3U0>. Acesso em: 16 março 2017.

nível escolar com o qual se estava trabalhando, como espaços vetoriais, operadores, autovetores, autovalores, degenerescência, entre outros. Dessa forma, no intuito de atender às necessidades do projeto, e adequá-lo ao nível de ensino para o qual se destinava, optou-se por simplificar o conhecimento de que tratam os postulados, através de um processo de transposição didática (CHEVALLARD, 1991). Assim, os aqui chamados “princípios fundamentais da Mecânica Quântica” (Saber a Ensinar) nada mais são do que uma transposição didática dos postulados da Mecânica Quântica (Saber Sábio), de acordo com as recomendações de Chevallard (1991), discutidas no Capítulo 3, e que foram tratados qualitativamente, pelas razões anteriormente expostas.

Antes do aprofundamento da discussão dos princípios, mais uma vez tomou-se o cuidado de ressaltar aos alunos que esses eram uma interpretação da Mecânica Quântica segundo a visão da Escola de Copenhague. Por opor aspectos físicos e filosóficos, a Mecânica Quântica é passível de interpretação e discussão, e daí a existência de visões diferentes desse ramo da Física, como as interpretações de Muitos Mundos e de Bohm (cuja discussão será aprofundada no Apêndice G), por exemplo. Passada essa fase, iniciou-se a discussão da equação de Schrödinger, cuja solução é a função de onda, que por sua vez, descreve todas as propriedades observáveis do sistema físico estudado. Ela foi apresentada como sendo o descritor da Mecânica Quântica, assim como as equações de movimento o são para uma partícula da Física Clássica. Por se tratar de uma equação diferencial, os alunos logicamente a estranharam. Porém, ao se abordar a mesma como a soma de parcelas de energia potencial e cinética, resultando na energia total da partícula, e fazendo-se uma analogia à energia mecânica de um sistema físico clássico, onde se pode ter o mesmo raciocínio, a aceitação por parte dos alunos foi satisfatória. A seguir, abordou-se o conceito de estado quântico. Como forma de exemplificar o princípio, mostrou-se um diagrama com as energias possíveis para o átomo de hidrogênio, onde cada energia corresponde a um nível e, agora, um possível estado. Aqui pode-se mais uma vez diferenciar a Mecânica Quântica da Clássica, uma vez que as energias possíveis do átomo de hidrogênio não são contínuas, mas sim discretas. O conceito de estado não causou grande surpresa nos alunos, mas a possibilidade da superposição desses estados, outra constatação da teoria quântica, sim. Para os estudantes, a ideia de vários estados coexistirem ao mesmo tempo não era algo aceitável, provavelmente porque essa ideia não fazia parte de nosso cotidiano. Ou seja, mesmo após a realização de um cuidadoso processo de transposição didática, os princípios fundamentais da Mecânica Quântica ainda eram de difícil compreensão para boa parte dos alunos. Esse fato mostrou a necessidade de um reforço

contínuo desses princípios, para que pudesse haver uma melhor estruturação dos subsunçores e, ao final, uma aprendizagem tendendo para se tornar significativa.

O tópico seguinte abordado foi a interpretação matemática da função de onda. O fato de existir apenas a possibilidade de se encontrar a partícula numa determinada região do espaço causou espanto nos alunos, pois mais um paradigma da Física Clássica estava se quebrando. Alguns alunos recordaram que uma das questões do Teste Inicial versava sobre probabilidades, explicando-se o porquê de a mesma constar do teste. O problema da medição trouxe mais perplexidade por parte dos estudantes, pois muitos não se convenciam de que o ato de medir, na Mecânica Quântica, altera o sistema observado, causando o colapso da função de onda. Analisando cada princípio separadamente, os alunos concordavam que os mesmos eram difíceis de compreender ou aceitar. Entretanto, conforme os mesmos foram sendo apresentados, os estudantes puderam perceber que esses princípios podiam fazer sentido dentro de um contexto mais amplo e novo, isto é, exigia uma nova visão de mundo. É difícil aceitar o fato de que vários estados podem coexistir dentro de um sistema físico, mas atribuir a cada estado uma probabilidade de o mesmo ocorrer faz com que o entendimento do princípio seja mais esclarecido.

Dentro da proposta principal do projeto, e a fim de ilustrar os princípios fundamentais da Mecânica Quântica aqui estudados, utilizou-se talvez a mais famosa analogia da Física Moderna, cunhada pelo próprio autor da equação que descreve a Mecânica Quântica, e tida quase que como um paradoxo: o gato de Schrödinger. Esse experimento mental, de fácil entendimento e conceitualmente acessível, tinha o objetivo de esclarecer os complexos princípios quânticos aqui trazidos, de modo a facilitar seu aprendizado de maneira significativa.

Esse sistema físico hipotético foi, então, apresentado aos alunos: um gato está aprisionado numa caixa completamente fechada, em cujo interior há um frasco de veneno que pode ser quebrado por um martelo, que por sua vez pode ser acionado devido ao decaimento de um átomo de uma substância radioativa. A probabilidade de ocorrer ou não o decaimento é a mesma, ou seja, 50%. Descrito o sistema, foi possível exemplificar os princípios trabalhados da seguinte forma:

- os estados possíveis para o gato eram dois, *vivo* e *morto*;
- uma função de onda que pudesse descrever o sistema poderia ser

$$\Psi_{gato} = \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{vivo} + \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{morto} ; \quad [1]$$

- a probabilidade de, abrindo-se a caixa, encontrar o gato vivo ou morto é a mesma, ou seja, de 50% para cada estado;
- mas enquanto a caixa não é aberta, como está o gato? Pela interpretação quântica aqui estudada, o gato estará, ao mesmo tempo, vivo *e* morto. É a superposição de estados. A grande questão aqui é interpretar o significado de “vivo e morto”, ou seja, a superposição de estados não é intuitiva e exige uma nova visão de mundo;
- caso a caixa seja aberta, estar-se-á se fazendo uma medição do estado quântico do gato. Nesse caso, verificar-se-á que o mesmo está em um dos estados possíveis, ou seja, vivo *ou* morto. O ato de medir altera a função de onda do sistema analisado, causando o colapso da mesma.

Abriu-se, como era de se esperar, uma calorosa discussão em torno da analogia. De todos os princípios apresentados, a maior divergência surgiu em torno da superposição de estados e do colapso da função de onda. Mesmo sem conhecer as outras interpretações da Mecânica Quântica, os alunos acabaram por discutir justamente os pontos discordantes entre a Interpretação de Copenhague e a Interpretação de Muitos Mundos, de Hugh Everett. Muitos alunos não concebiam a possibilidade de vários estados coexistirem ao mesmo tempo, como no caso do gato de Schrödinger, ao mesmo tempo vivo e morto. Outros alunos conceberam suas próprias analogias para tentar entender os princípios. Uma delas dizia respeito ao resultado de uma partida de futebol: caso o jogo já tivesse ocorrido, mas não se soubesse o resultado da partida, dever-se-ia entender que um time, ao mesmo tempo, teria ganho, empatado e perdido a partida, sugeriu um dos alunos. Guardadas as devidas proporções, foi considerada uma boa analogia. Essa discussão em torno do experimento mental do gato de Schrödinger foi considerada extremamente produtiva, tendo em vista o nível de participação dos alunos. Finalizando o tópico, foi exibido um vídeo de uma famosa série de TV⁹, onde o experimento do gato era mencionado e exemplificado, o que ajudou a descontrair o ambiente.

O segundo tempo da aula iniciou com uma nova revisão da simulação computacional do experimento da dupla-fenda com partículas (Seção 5.7.6). Deu-se ênfase, principalmente, à situação em que apenas uma partícula por vez era enviada em direção ao obstáculo. Ali ficou bastante claro para os alunos que uma única partícula, ao passar pelo obstáculo, interfere com ela mesma, pois o resultado que se obtém no anteparo, após a emissão de uma quantidade

⁹ The Big Bang Theory, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=SiiQbwRPVig&t=2s>. Acesso em 16 março 2017.

apreciável de partículas, é uma figura de interferência, um fenômeno tipicamente ondulatório. “Mas como podemos saber por qual fenda a partícula passou?”, perguntaram alguns alunos. Esse foi o estopim para nova e acalorada discussão. Após o experimento mental do gato de Schrödinger, os alunos puderam acompanhar os princípios fundamentais da Mecânica Quântica num experimento virtual. A partícula que interfere consigo mesma ao passar pelo obstáculo é descrita por uma função de onda, que se mantém preservada caso não se intervenha no experimento. Porém, ao se tentar identificar por qual fenda a mesma passou, está se realizando uma medição que, por sua vez, altera a função de onda, colapsando a mesma. O resultado prático disso é que a figura de interferência projetada sobre o anteparo é substituída por uma figura com um único máximo central perceptível (figura de difração), também chamado de borrão. A simulação computacional do experimento da dupla-fenda com partículas permitiu que fossem verificados todos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica aqui estudados, dando a oportunidade de discuti-los de maneira pormenorizada e individualizada com os alunos. Estes, por sua vez, puderam explorar e reforçar os subsunçores referentes a estes princípios, de maneira a articulá-los e enriquecê-los cada vez mais em sua estrutura cognitiva, sempre objetivando uma aprendizagem significativa. Assim, entendeu-se que os alunos, em sua grande maioria, estavam preparados para discutir o experimento da borracha quântica, o que se deu na sequência.



Figura 5.2: montagem experimental da borracha quântica. FONTE: o autor.

O experimento da borracha quântica é bastante simples em termos de montagem, que foi realizada na presença dos alunos, como pode-se ver na Figura 5.2. Uma proposta detalhada

de montagem e obtenção dos materiais necessários ao experimento pode ser encontrada em Junior e Lunazzi (2007). O esquema da borracha quântica foi apresentado na Figura 1.1. O material utilizado no experimento da borracha quântica tinha sido preparado e testado com certa antecedência porque, apesar de simples, necessitava de cuidados especiais em sua preparação que demandaram um certo tempo.

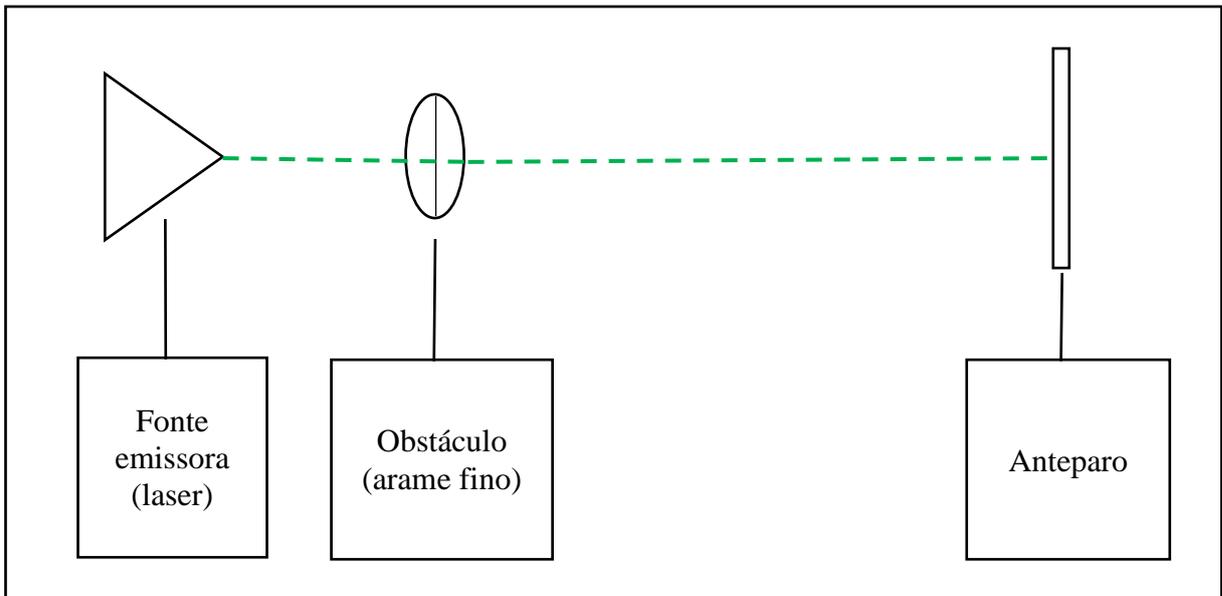


Figura 5.3: representação esquemática de um experimento de interferência de ondas luminosas. FONTE: o autor.

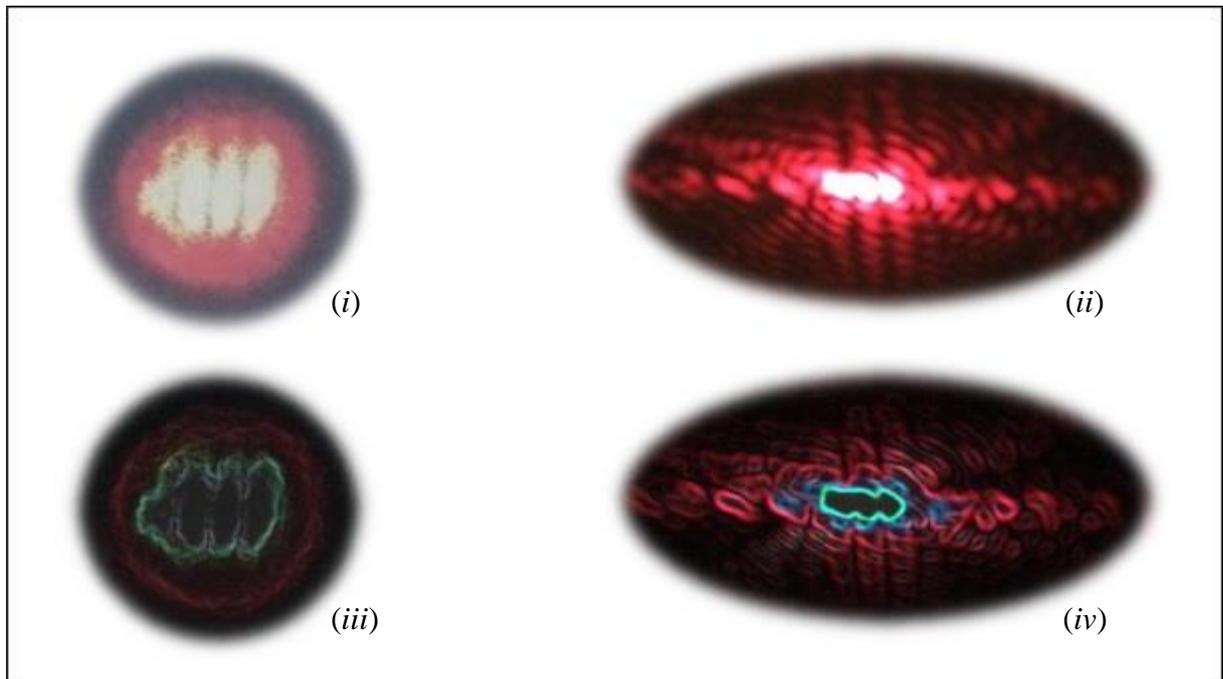


Figura 5.4: resultados experimentais obtidos com o experimento de interferência de ondas luminosas. FONTE: imagem (i): Hillmer e Kwiat (2007); imagens (ii), (iii) e (iv): o autor.

O primeiro fenômeno que se desejava mostrar aos alunos era a interferência com ondas luminosas, num experimento análogo ao utilizado por Young em sua famosa experiência da dupla-fenda. Para isso, o aparato inicial contava apenas com a fonte emissora (um laser com comprimento de onda de 635 nm), um arame fino, a fim de servir de análogo ao experimento de dupla-fenda (uma vez que o laboratório não dispunha daquele material, e pela dificuldade de se produzir um obstáculo de tamanho tão reduzido, da ordem do comprimento de onda do laser utilizado), e o anteparo, como mostra a Figura 5.3. Os alunos foram informados de que a fonte emitia vários fótons simultaneamente, não sendo possível realizar a emissão de um único fóton a cada vez, como fora feito na simulação computacional. Aqui discutiu-se com os alunos quais princípios fundamentais da Mecânica Quântica podiam ser identificados, sendo citados pelos mesmos os possíveis estados daquele sistema físico, a forma da função de onda associada, e a probabilidade de se conhecer o lado pelo qual os fótons estavam passando (ressaltou-se mais uma vez aos alunos que, na verdade, como o experimento não permitia a emissão de uma única partícula por vez, tinha-se vários fótons passando por ambos os lados ao mesmo tempo, e assim o princípio da probabilidade não se aplicava tão bem nessa situação). Nessa configuração, como o arame fino funciona como um obstáculo semelhante a uma dupla-fenda, a imagem obtida no anteparo é uma figura de interferência, similar às verificadas anteriormente nas simulações computacionais.

O resultado alcançado em sala de aula está apontado na imagem (ii) da Figura 5.4, e pode ser comparado com a imagem (i), que traz o resultado experimental obtido por Hillmer e Kwiat (2007). As imagens (i) e (ii) foram retiradas diretamente dos anteparos, sendo que a obtida em sala não possui nenhum tipo de tratamento especial. Já as figuras (iii) e (iv) são as mesmas imagens, porém submetidas a um filtro de efeito artístico, cuja finalidade é deixar apenas as extremidades brilhantes, diminuindo o excesso de luz e dando ênfase às bordas da imagem, tudo no intuito de facilitar a percepção e verificar se ali pode ser identificado algum padrão conhecido ou esperado. Esse mesmo tratamento foi aplicado a todos os resultados que serão apresentados na sequência. Dessa forma, pode-se perceber que ambos os experimentos conseguiram, de alguma maneira, obter uma figura de interferência, como era esperado, já que o experimento simula, nessa configuração, um obstáculo do tipo dupla-fenda.

A seguir, o arame fino foi substituído pelo identificador de caminho, conforme retratado na Figura 5.5.

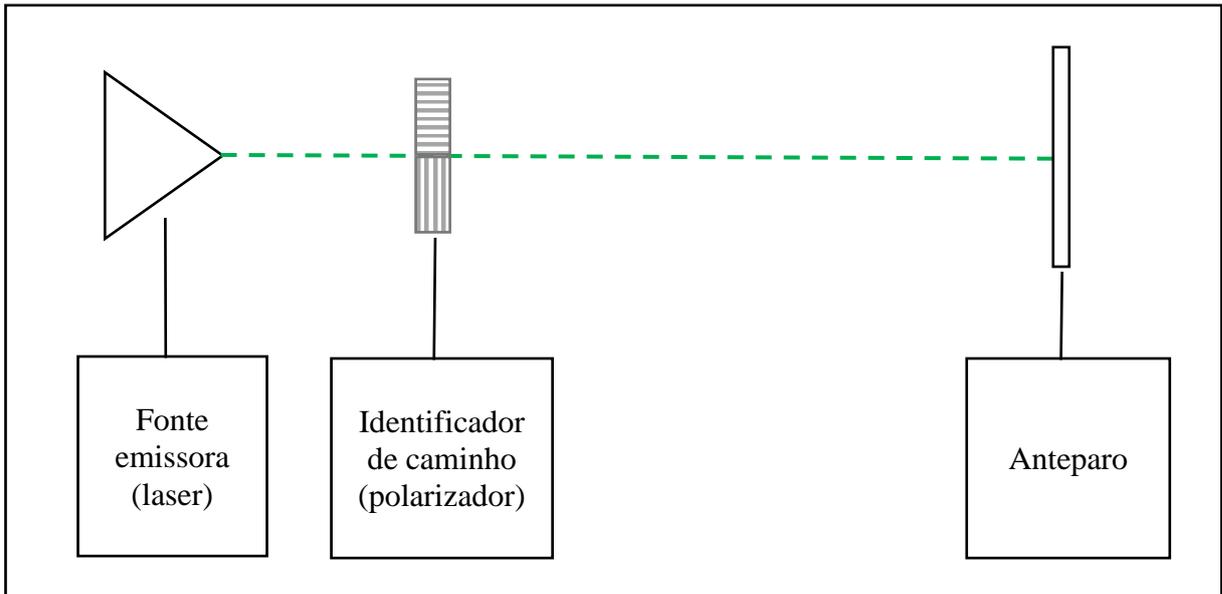


Figura 5.5: representação esquemática do experimento da borracha quântica, quando montada apenas com o identificador de caminho. FONTE: o autor.

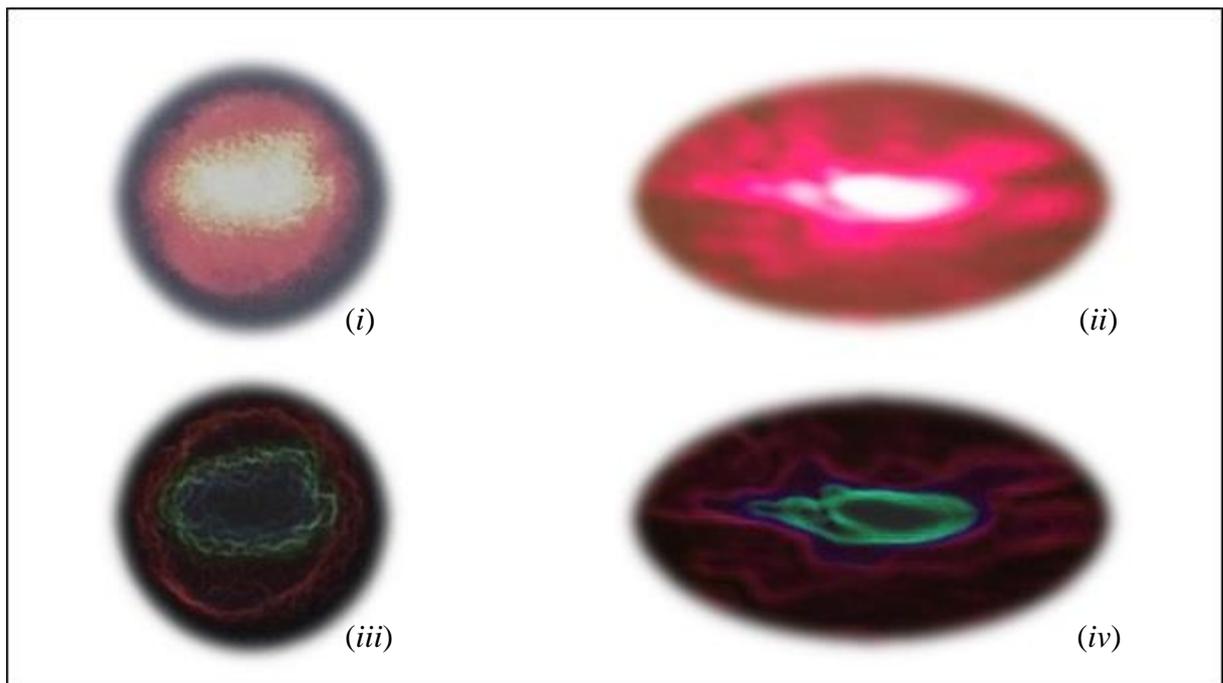


Figura 5.6: resultados experimentais obtidos com a borracha quântica, quando montada apenas com o identificador de caminho. FONTE: imagem (i): Hillmer e Kwiat (2007); imagens (ii), (iii) e (iv): o autor.

Como descrito anteriormente, o identificador de caminho possui esse mesmo tipo de obstáculo, acrescido de filtros polarizadores orientados perpendicularmente entre si em cada lado do arame. Quando o experimento adquire essa configuração, o identificador de caminho polariza os fótons que passam pela esquerda e pela direita do arame de acordo com a orientação dos polarizadores (horizontal ou vertical). Com isso, obtém-se alguma informação a respeito dos fótons, o que equivale, dentro dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica

estudados, a se fazer uma medição, devido à capacidade de seleção dos fótons pelo identificador de caminho. Imediatamente alguns alunos alertaram que isso traria consequências ao experimento, o que foi constatado de fato. Outros alunos não entenderam o porquê disso. Foi lembrado, então, que o ato de medir causa o colapso da função de onda, evento que pode ser verificado pela perda da figura de interferência projetada no anteparo. De fato, o que se obteve foi uma imagem do tipo borrão, como mostra imagem (ii) da Figura 5.6, a qual se assemelhou bastante à imagem (i), alcançada por Hillmer e Kwiat (2007), situada ao lado, na mesma figura. Pode-se perceber com bastante nitidez, inclusive com o auxílio das imagens (iii) e (iv) (tratadas com o filtro de efeito artístico), que os padrões de interferência da Figura 5.4 não mais existiam, o que corrobora o conceito do colapso da função de onda. Esse resultado ajudou os alunos a internalizar ainda mais os princípios estudados, de maneira a convencê-los de que, apesar de estranha à sua realidade cotidiana, a Mecânica Quântica fazia sentido quando estudada de uma forma estruturada.

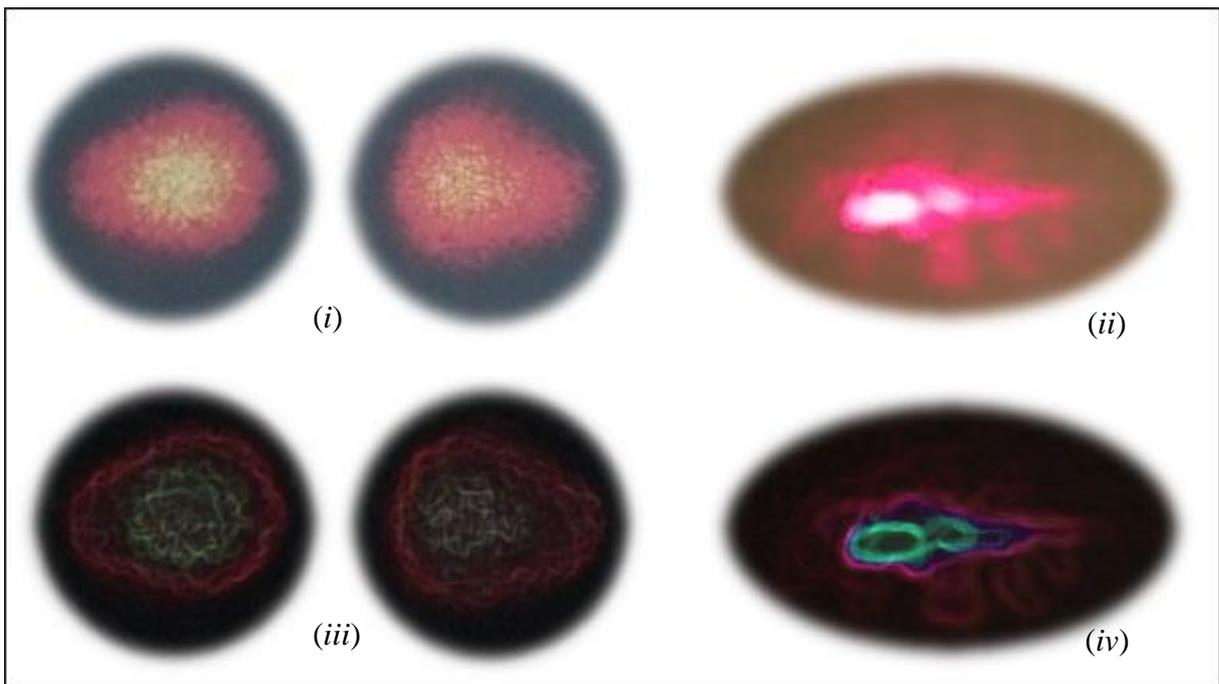


Figura 5.7: resultados experimentais obtidos com o experimento da borracha quântica (seleção de fótons).
 FONTE: imagem (i): Hillmer e Kwiat (2007); imagens (ii), (iii) e (iv): o autor.

Finalmente, é inserido no experimento o analisador, que é um filtro polarizador com orientação ajustável, e deixa o experimento da borracha quântica completo, conforme mostrado na Figura 1.1. O analisador foi inicialmente colocado na orientação horizontal, o que obrigatoriamente o deixa perpendicularmente orientado em relação a um dos polarizadores do identificador de caminho, e paralelamente orientado em relação ao outro. Com isso, metade dos

fótons que passaram pelo identificador de caminho são agora bloqueados pelo analisador, enquanto a outra metade não é afetada. O resultado prático dessa configuração é um acúmulo dos fótons em um dos lados do borrão, que equivale à orientação de polarização do analisador. Mesmo que essa parte do experimento não tenha abrangido nenhum princípio específico dos que foram estudados, foi interessante mostrar aos alunos como pode se dar a manipulação dos fótons em um experimento que utiliza filtros polarizadores. A Figura 5.7, a exemplo das demais, traz na imagem (ii) o resultado experimental obtido em sala de aula, em comparação com a imagem (i), onde estão os resultados alcançados por Hillmer e Kwiat (2007), que utilizaram o analisador nas orientações horizontal e vertical. Mais uma vez, pode-se perceber que há semelhança com relação ao padrão dos dois experimentos. Verifica-se, também, que o resultado experimental obtido em sala de aula está com os fótons mais concentrados à direita, quando comparado com o resultado exposto na Figura 5.6, o que comprova o poder de manipulação dos objetos quânticos.

Pelo que foi apresentado até aqui, o experimento da borracha quântica, a exemplo da simulação computacional que reproduz a experiência da dupla-fenda, consegue tratar de todos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica estudados até então. Se montada conforme a Figura 5.3, tem-se um sistema físico que pode ser descrito por uma função de onda a ele associada, cujo quadrado de seu módulo dá a probabilidade de se encontrar um dos dois estados possíveis. Apesar de um número imenso de fótons estar passando pelos dois lados do arame ao mesmo tempo, quanticamente pode-se entender que cada fóton interfere consigo mesmo, formando uma figura de interferência sobre o anteparo. Como cada fóton interfere consigo mesmo, não se pode afirmar por qual lado do arame o mesmo está passando, e com isto tem-se a superposição de estados. Ao se montar o experimento conforme a Figura 5.5, tem-se aí uma tentativa de obter informações a respeito do fóton, o que configura uma medição e o consequente colapso da função de onda, resultando na perda do padrão de interferência no anteparo. As informações decorrentes da tentativa de medição dos fótons se materializam na Figura 5.7, com uma maior concentração deles ocorrendo à esquerda ou à direita da posição inicial, de acordo com o posicionamento do analisador.

A teoria quântica aqui estudada, de acordo com a Interpretação da Escola de Copenhague, prevê que, uma vez colapsada, a função de onda não pode mais retomar sua forma original naquele determinado sistema físico. Ou seja, a informação perdida não pode mais ser recuperada. Mas, de alguma forma, seria possível readquirir essa informação? Esse cenário foi exposto aos alunos, causando as mais diversas manifestações. A grande maioria respondeu

corretamente que não. Outros ficaram em dúvida. Uma pequena parcela acenou de maneira positiva.

A grande surpresa do experimento da borracha quântica é que o padrão das franjas de interferência, perdido por ocasião da atuação do identificador de caminho, pode ser recuperado. Para isso, basta girar o analisador de 45° em qualquer sentido, horário ou anti-horário, e tem-se o restabelecimento do padrão de interferência. Isso acontece porque o analisador consegue “apagar” a informação sobre por qual lado do arame o fóton passou, permitindo que o mesmo readquirira sua polarização original. Assim, devido a essa nova configuração do experimento, cada fóton com polarização vertical ou horizontal tem a mesma chance de ter passado por um dos lados do arame, uma vez que nada mais se sabe a seu respeito. O resultado prático disso é o reaparecimento das franjas de interferência, o que pode ser verificado na imagem superior direita da Figura 5.8.

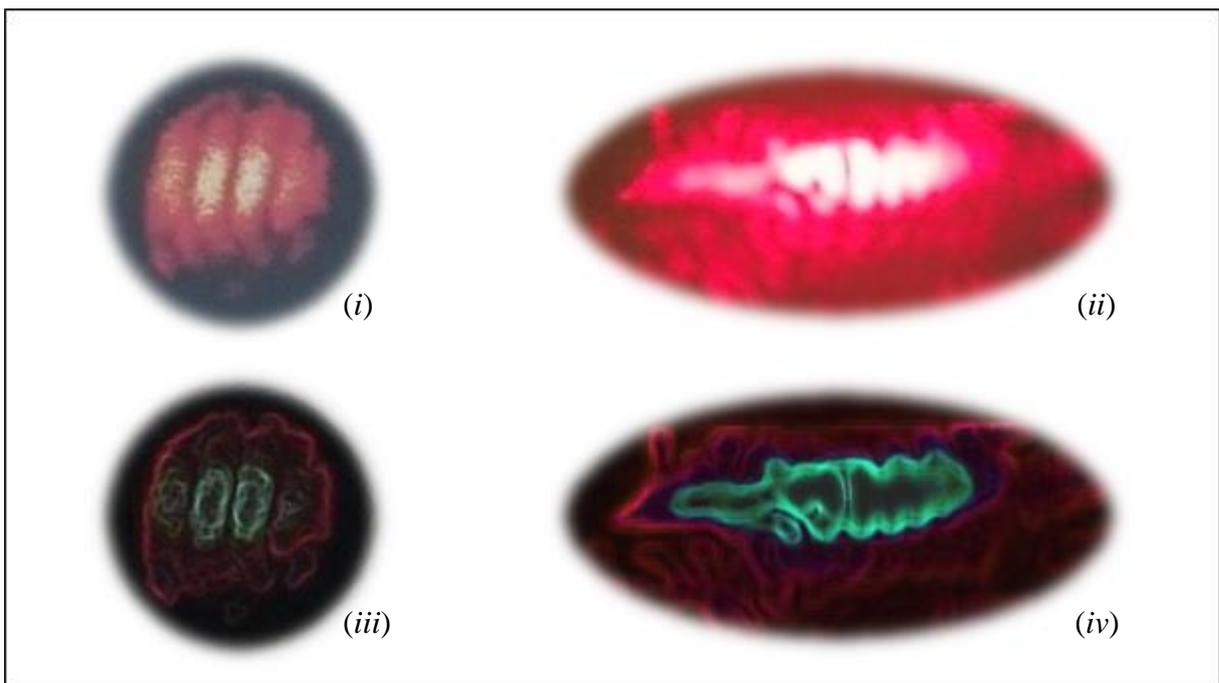


Figura 5.8: resultados experimentais obtidos com o experimento da borracha quântica (reaparecimento das franjas de interferência). FONTE: imagem (i): Hillmer e Kwiat (2007); imagens (ii), (iii) e (iv): o autor.

Aqui percebe-se novamente que o resultado experimental obtido em sala de aula, visto na imagem (ii) da Figura 5.8, se aproxima do auferido por Hillmer e Kwiat (2007), imagem (i) da mesma figura. Tomou-se o cuidado de ressaltar aos alunos que todas as imagens obtidas em sala de aula possuem um padrão que se assemelha às imagens que serviram de base para a comparação. Entretanto, para o experimento da borracha quântica montado em sala de aula, foram utilizados materiais alternativos e de baixo custo, principalmente os filtros polarizadores,

figuras principais do experimento, e provenientes de telas LCD de calculadoras e mostradores digitais. A baixa qualidade desses materiais, aliada aos métodos de obtenção dos mesmos, fizeram com que as imagens resultantes dos fenômenos ficassem visualmente mais poluídas.

Entretanto, apesar de permitir o tratamento de todos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica aqui estudados, a borracha quântica é, na verdade, um experimento da Física Clássica. É a chamada restauração clássica do padrão de interferência, sendo sua explicação bem estabelecida pela ótica ondulatória. Essa informação frustrou alguns alunos, que nutriam grande expectativa pelo experimento. A eles foi explicado que um experimento a nível quântico requer manipulação individual de fótons ou partículas, e tal fato só é possível com equipamentos encontrados em avançados laboratórios, o que não era em nosso caso. Ainda assim, a grande maioria ficou satisfeita com os aspectos que puderam ser observados no experimento.

Após a apresentação do experimento da borracha quântica, cabe uma pequena discussão de duas curiosidades sobre o mesmo. Uma delas diz respeito à tradução do termo borracha quântica (do inglês *quantum eraser*). Talvez o termo que melhor traduziria a característica do experimento seria *apagador quântico*, uma vez que o analisador tem a função de apagar qualquer informação obtida sobre os fótons que passaram pelo analisador de caminho. A palavra borracha pode causar certa confusão ao leitor desavisado, que pode interpretá-la como sendo uma borracha escolar (que estaria correto) ou uma liga de borracha qualquer, utilizada para as mais diversas finalidades, e que nada tem a ver com o experimento. Entretanto, o termo borracha quântica continuará a ser empregado ao longo deste trabalho. A outra curiosidade é que a borracha quântica também serve de análogo a outro consagrado experimento, que auxiliou no avanço da Física Quântica: o experimento de Stern-Gerlach. Para uma visão detalhada sobre o assunto, pode-se consultar Sakurai e Napolitano (2013).

5.5. Quinto Encontro – Contextualização do mundo quântico que nos rodeia

O quinto encontro aconteceu no dia 27 de setembro, e teve por finalidade discutir como a Mecânica Quântica se materializa nos dias atuais. Antes, porém, foi realizada a já tradicional revisão dos conteúdos vistos nos encontros anteriores. A aula iniciou-se, então, com a retomada dos princípios fundamentais que regem a Mecânica Quântica. A estratégia adotada nesse dia fazia com que os alunos explicassem, com suas palavras, esses princípios. Em sua grande maioria, os estudantes descreveram corretamente os princípios da função de onda, de estado, da interpretação matemática da função de onda, da superposição de estados, do problema da

medição na visão da Escola de Copenhague, e do colapso da função de onda. Os alunos ainda foram desafiados a descrever o experimento mental do gato de Schrödinger, citando cada um dos princípios que nele podiam ser verificados. De uma maneira geral, a participação foi muito boa, pois alguns alunos tentavam explicar aos colegas alguns pontos que não eram totalmente claros ainda, como a superposição de estados e o colapso da função de onda, que foram, sem dúvida, os mais discutidos.

Foi verificado que na aula anterior alguns alunos não se mostraram completamente convencidos com os resultados alcançados com o experimento da borracha quântica. As imagens produzidas pelo experimento e projetadas no anteparo, além de pequenas, eram de difícil visualização, pelos motivos comentados ao fim da discussão da aula anterior. Dessa forma, optou-se por montar e apresentar figuras comparativas entre os resultados alcançados experimentalmente em sala de aula e os obtidos por Hillmer e Kwiat (2007), e que, por uma questão de praticidade e objetividade, constaram da descrição da aula anterior (Figuras 5.4, 5.6, 5.7 e 5.8). Os alunos, ao poderem confrontar os resultados experimentais da sala de aula e do trabalho de referência, mostraram-se um pouco mais convencidos, principalmente nas imagens que foram submetidas a um filtro de efeito artístico, que facilitou a percepção dos padrões por parte de todos. Dessa forma, os princípios fundamentais da Mecânica Quântica foram mais uma vez citados, sob a perspectiva do experimento da borracha quântica. A natureza clássica do experimento também foi lembrada, bem como a impossibilidade quântica de se recuperar os estados originais de uma função de onda colapsada, segundo a visão da Escola de Copenhague.

Findada a revisão, partiu-se para a discussão das contribuições da Mecânica Quântica na atualidade. O primeiro assunto trazido foi o fenômeno do tunelamento quântico, que se baseia nos princípios até então estudados. Aos alunos foi dada uma breve explicação do fenômeno, que foi ilustrado com a utilização de outra simulação computacional (Seção 5.7.8). Essa simulação trazia um pacote de ondas que se deslocava até encontrar uma barreira de potencial. Dependendo da configuração adotada, parte do pacote era refletido pela barreira, e outra parte conseguia por ela passar. A fim de facilitar a compreensão do fenômeno, utilizou-se uma analogia com uma piscina d'água com ondas. As ondas que colidiam com as paredes da piscina eram completamente refletidas, sendo classicamente impossível que parte dela pudesse passar para o lado de fora da mesma. Quanticamente, no entanto, existia uma probabilidade não nula de parte da onda tunelar, e esse estranho comportamento foi trabalhado com os alunos. Devido à pequena disponibilidade de tempo, optou-se por tratar apenas a parte conceitual do fenômeno, não abordando a descrição matemática do mesmo. Entretanto, a simulação

computacional facilitou em muito a compreensão do tunelamento pelos estudantes. Como exemplo de aplicação, comentou-se a respeito do microscópio de varredura por tunelamento. Um vídeo¹⁰ exemplificando o fenômeno e o funcionamento do microscópio também foi exibido, a fim de facilitar a compreensão dos estudantes. Além disso, foram apresentadas imagens obtidas com o uso do microscópio, que mostravam estruturas atômicas com dimensões de nanômetros. Outra possibilidade comentada foi a capacidade do microscópio de manipular átomos individuais. A recepção dos alunos foi considerada bastante positiva, tanto na parte conceitual quanto na tecnológica.

Na segunda parte da aula, abordou-se o conceito do emaranhamento quântico. Devido à complexidade do assunto, que poderia ocupar o espaço de uma aula inteira, dada sua importância e atualidade, tentou-se abordar apenas os pontos cruciais do mesmo. Para atingir tal objetivo, descreveu-se o conceito de emaranhamento através de um exemplo de fótons polarizados, cujo conhecimento prévio (subsunçores iniciais) dos estudantes já vinha do experimento da borracha quântica. Foi, então, apresentada uma função de onda que descrevia o estado desses fótons, cuja principal ideia contida era que, ao se tentar medir o estado de um fóton (polarizado vertical ou horizontalmente), ter-se-ia, de maneira instantânea, o estado do outro fóton sem a necessidade de realizar outra medição. Essa ideia deixou muitos alunos confusos, de maneira que foi necessário explicar a teoria novamente. Paralelamente, a fim de ilustrar ainda mais o conceito, apresentou-se o chamado paradoxo EPR, proposto por Einstein, Podolsky e Rosen em 1935 como forma de crítica à teoria quântica que ia se desenhando. O principal contraponto do paradoxo à teoria quântica era que o emaranhamento feria um dos postulados da teoria da relatividade restrita de Einstein, onde nenhuma informação pode viajar mais rápido que a luz. Ainda segundo eles, a teoria quântica feria os conceitos de localidade e causalidade. Confrontados com essa contradição, os alunos foram levados a raciocinar e a questionar como se dá a construção do pensamento científico, onde várias ideias surgem, são discutidas, e até mesmo combatidas. Para reforçar que a teoria quântica não estava incorreta, foi citado o teorema de Bell, que afirmava que, dentre outras coisas, a Mecânica Quântica é não-local. Bell consegue provar que o emaranhamento é possível, e põe por terra o paradoxo EPR. Por fim, foram citadas algumas aplicações práticas do emaranhamento, como os computadores quânticos, a criptografia quântica e o teletransporte quântico. Essa última aplicação gerou uma discussão entre os alunos, que ficaram decepcionados ao saber que apenas informações (e não matéria) podem ser teletransportadas. Tratou-se, ainda, sobre os

¹⁰ Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=YBOOIWjXOsY>. Acesso em 03/02/17.

computadores quânticos, através do conceito de bit quântico, e das possibilidades dessa nova tecnologia, quando implantada.

O último tópico apresentado introdutoriamente, por questão de tempo, foi a supercondutividade, que é outra consequência da teoria quântica, e onde os efeitos quânticos podem ser verificados em escala macroscópica. Apesar de aqui não aparecerem de forma imediata os conceitos quânticos estudados, foram citados os principais aspectos da teoria, como a formação dos pares de Cooper e o diamagnetismo dos supercondutores. Sem dúvida, o efeito mais impressionante dessa teoria é o fenômeno da levitação magnética, e sua potencial aplicação nos transportes, através dos trens de levitação. Um projeto nesse sentido, desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) foi exposto aos alunos. Por fim, foi levantada a ideia de que todos os equipamentos ou dispositivos ditos “eletrônicos” envolvem, em algum nível, a manipulação de elétrons em um circuito. Assim, qualquer aparelho que contenha um circuito (ou placa) eletrônico é baseado na Mecânica Quântica. Devido à falta de tempo, não foi possível um maior aprofundamento no assunto. Esse exemplo final foi trazido de forma a mostrar para os estudantes que a Mecânica Quântica está mais presente ao seu redor do que eles poderiam imaginar.

A aula findou com um alerta em relação ao mau uso da teoria quântica por pessoas ou empresas, que tentam se utilizar dos conceitos quânticos para explicar fatos alheios a estes. Deu-se ênfase ao fato de que a teoria quântica se resume a descrever o comportamento de partículas atômicas e pequenas moléculas, não cabendo sua utilização para a descrição do mundo macroscópico. E que tanto a Mecânica Quântica como a Clássica comungam dos mesmos pressupostos físicos, principalmente no que diz respeito às leis de conservação. Assim, os alunos foram alertados sobre a necessidade de sempre desconfiar de máquinas do tipo moto-perpétuos ou de energia livre, da chamada cura quântica e cura à distância (e seus infundáveis seguidores e disseminadores), e de qualquer efeito mágico atribuído à teoria quântica. Questionados a respeito, vários alunos relataram já ter ouvido falar de algumas dessas expressões. A justificativa utilizada para afastar a teoria quântica desses exemplos foi que eles simplesmente não encontram base na teoria, tampouco são encontrados em quaisquer publicações cientificamente reconhecidas. Após alguma discussão, a aula foi encerrada, e com ela as ideias que se tentou passar ao longo de mais de nove horas de projeto.

5.6. Sexto Encontro

O sexto e último encontro ocorreu no dia 29 de setembro, após vinte e quatro dias do início do projeto. Ele se destinou somente à aplicação do Teste Final, e a discussão dos resultados será realizada no próximo capítulo.

5.7. Simulações computacionais utilizadas nos encontros

Deste ponto, até o fim do capítulo, serão tecidas discussões a respeito das simulações computacionais utilizadas durante o projeto. Como já comentado anteriormente, todas foram de fundamental importância para o bom andamento das aulas, pois pouparam um tempo precioso, propiciando a abordagem de um maior número de temas. O reduzido número de encontros não teria sido tão bem aproveitado caso fosse necessário expor todos os esquemas e ideias no quadro branco. Não bastasse isso, as simulações ainda são fundamentadas em animações dinâmicas, o que naturalmente atrai mais a atenção dos alunos do que uma abstrata explicação de um fenômeno, baseado em figuras ou gráficos representados na lousa. Ainda nessa linha de pensamento, todas as simulações aqui utilizadas são oriundas do site da Universidade do Colorado, EUA, através da ferramenta *PhET*¹¹, que disponibiliza as simulações em português, de maneira gratuita, dentro das áreas da Física, Química, Biologia, Matemática e Ciências da Terra. Assim, qualquer aluno ou professor pode interagir com os recursos, uma vez que os mesmos podem ser acessados via internet, ou mesmo instalados previamente em um computador, não havendo necessidade de conexão com a rede.

Cada simulação será descrita de maneira sumária, além de ter ressaltadas suas diversas possibilidades educacionais, a forma como foram empregadas no projeto, além de um breve comentário a respeito das impressões dos alunos, ao serem confrontados com essas ferramentas.

5.7.1. Simulação computacional sobre o espectro de emissão de um corpo negro¹²

- Descrição sumária: a simulação permite verificar como se dá a distribuição da intensidade de radiação de um corpo, numa determinada temperatura, em função dos seus diversos comprimentos de onda. Ou seja, ela mostra a curva espectral de um corpo, baseado em sua temperatura.

¹¹ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/. Acesso em 03/02/17.

¹² Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/blackbody-spectrum. Acesso em 03/02/17.

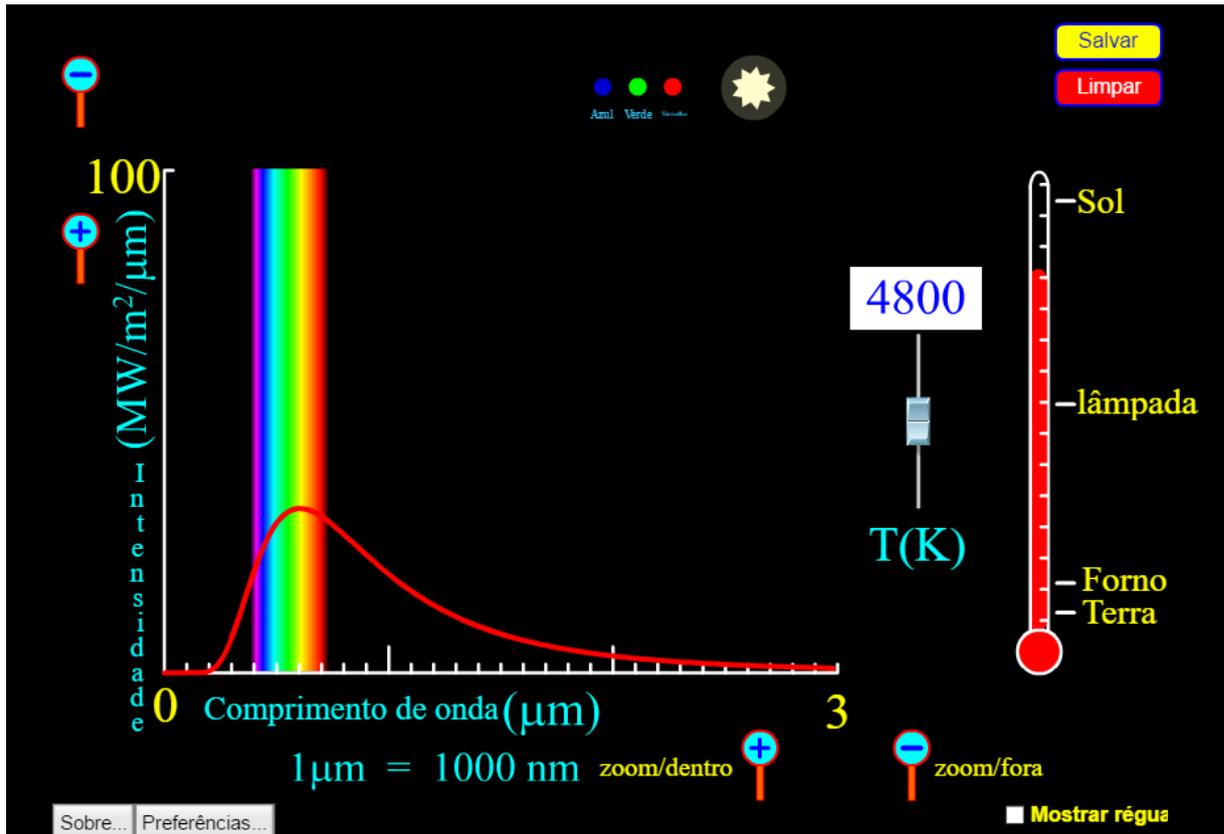


Figura 5.9: simulação computacional sobre o espectro de emissão de um corpo negro. FONTE: captura de tela.

- Possibilidades educacionais: a simulação possibilita que se insira uma temperatura qualquer, em escala absoluta, e automaticamente ela ajusta a curva espectral num gráfico, que mostra seu comportamento. Existem algumas temperaturas predefinidas de corpos como o Sol, uma lâmpada incandescente, um forno e a Terra, mas qualquer temperatura pode ser ajustada de forma manual ou com o auxílio de um botão. Dependendo da temperatura escolhida, há a necessidade de se ajustar a escala do gráfico através de botões existentes em ambos os eixos. Por fim, no alto, um mostrador exibe qual é a percepção visual da cor predominante atribuída à temperatura escolhida.

- Forma de utilização no projeto: utilizada no primeiro encontro, a simulação permitiu a visualização da curva de emissão de um corpo negro, mais particularmente dos picos de emissão. Foi bastante importante no sentido de fazer o aluno entender que qualquer corpo se comporta como um corpo negro, porque a ele está relacionada uma temperatura, e isso faz com que o mesmo emita radiação, o que foi considerado uma surpresa por muitos alunos. Como exemplo, com a utilização de um termômetro infravermelho, disponível no laboratório, estipulou-se a temperatura de alguns corpos presentes no local, como mesas, paredes, o projetor e o próprio corpo humano. A seguir, essas temperaturas foram inseridas na simulação, que por sua vez gerou as curvas dos espectros de emissão desses corpos. Como essas temperaturas

estavam entre 300K e 400K, os picos de emissão encontravam-se dentro da faixa do infravermelho do espectro eletromagnético. A fim de diversificar os exemplos, os alunos foram convidados a preencher a duas últimas colunas da tabela 5.2, constante do Guia da Aula 1.

Corpo	Temperatura (K)	Comprimento de onda (nm)	Faixa do espectro eletromagnético (pico)
Terra	300	~ 12000	IV
Forno	660	~ 9000	IV
Filamento lâmpada	3000	~ 1000	IV
Sol	5700	~ 550	Visível
Lava	1300	~ 2500	IV
Gigante Vermelha	4500	~ 650	Visível
Gigante Azul	20000	~ 200	UV
Anã Branca	25000	~ 100	UV
Anã Marrom	2000	~ 1500	IV
N (líquido)	75	~ 40000	IV
He (líquido)	4	~ 700000	Limite IV - micro-ondas
He (sólido)	1	~ 3000000	Micro-ondas

Tabela 5.2: exemplos de corpos negros, com respectivas temperaturas, comprimentos de onda e faixa do EEM ao qual pertencem. FONTE: o autor.

- *Feedback* dos alunos: positivo, com alguma interação devido à utilização do termômetro infravermelho, e discussões a respeito do tema. Supõe-se que essa pequena interação se deu pelo fato de ser o primeiro encontro, além de ser também a primeira simulação com a qual se trabalhou.

5.7.2. Simulação computacional sobre lâmpadas de neônio e outras lâmpadas de descarga ¹³

- Descrição sumária: a simulação permite entender como é o funcionamento de uma lâmpada de descarga, através do bombardeamento, por elétrons, de átomos de um gás rarefeito, encapsulado numa ampola.

¹³ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/discharge-lamps. Acesso em 03/02/17.

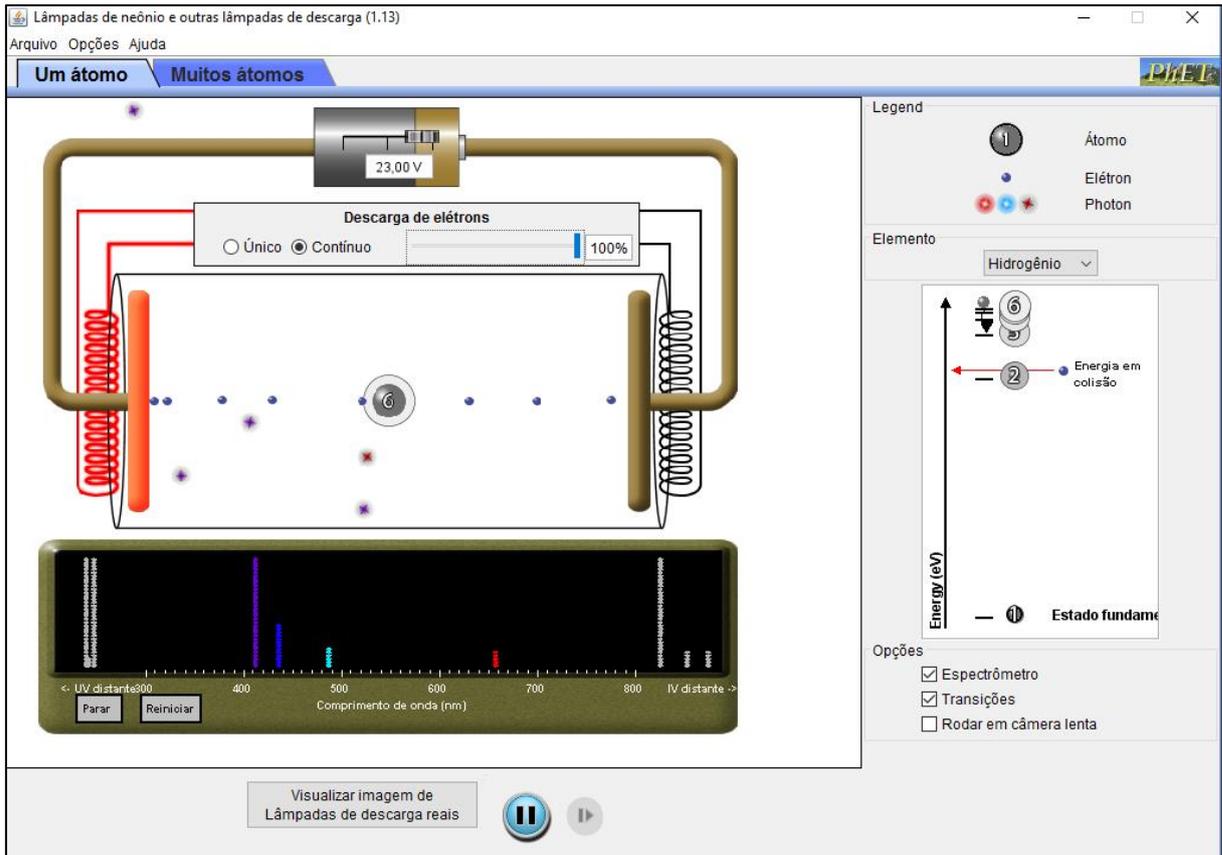


Figura 5.10: simulação computacional sobre lâmpadas de neônio e outras lâmpadas de descarga. FONTE: captura de tela.

- Possibilidades educacionais: entender o funcionamento de uma lâmpada de descarga é apenas uma das possibilidades da simulação. Mais do que isso, ela propicia o entendimento de uma das formas como se dá a emissão de fótons por um átomo, através da variação (saltos) dos seus estados de energia permitidos. Há a possibilidade de simular o comportamento de um ou vários átomos, de se visualizar um espectrômetro que conta individualmente os fótons emitidos, e de perceber como se dá a transição entre os níveis de energia de um átomo, através de um diagrama. Ainda pode-se escolher entre átomos de hidrogênio, mercúrio, sódio e neônio, que irão gerar diferentes linhas espectrais e, conseqüentemente, diferentes comprimentos de onda.

- Forma de utilização no projeto: empregada no final do primeiro encontro, a simulação foi a melhor maneira de, num curto intervalo de tempo, tentar fazer com que os alunos percebessem como se dava o processo de emissão e absorção de fótons pelos átomos. Tarefa essa bastante difícil, pois os alunos não possuíam os subsunçores necessários para tal. Então, optou-se pela explicação sumária do fenômeno a partir da visualização da simulação. A compreensão desses conceitos era importante naquele ponto do projeto, a fim de dar sentido e complementar o entendimento do tema radiação do corpo negro. Dessa forma, pode-se iniciar

a discussão a respeito de alguns assuntos que seriam vistos mais adiante, como do porquê de apenas alguns níveis de energia serem admitidos para os átomos, por exemplo.

- *Feedback* dos alunos: positivo, mas com menos participação do que a primeira simulação, talvez pela complexidade do assunto ou pelo fato de os alunos já estarem cansados, devido à proximidade com o fim da aula. De qualquer forma, as discussões geradas foram consideradas profícuas, e encorajaram ainda mais o uso dessas ferramentas no decorrer do projeto, isto é, reforçou o planejamento das aulas subsequentes (bastante baseado na exploração de simulações).

5.7.3. Simulação computacional sobre interferência de ondas ¹⁴

- Descrição sumária: apesar do título aparentemente restringir seu uso, a simulação permite visualizar não só o fenômeno da interferência de ondas, mas também a refração e a reflexão de ondas na água, em ondas sonoras e ondas luminosas, facilitando a percepção desses fenômenos por parte dos estudantes.

- Possibilidades educacionais: a simulação se comporta exatamente como se fosse uma cuba d'água, onde boa parte dos fenômenos ondulatórios podem ser visualizados. Uma barreira pode ser estabelecida para que se perceba a reflexão, assim como um obstáculo com uma fenda pode simular a difração. Estabelecendo um obstáculo com duas fendas, visualiza-se a interferência. Ainda é possível modificar a frequência e amplitude das ondas, bem como os parâmetros dos obstáculos, como largura e distância das fendas e a posição da barreira. Pode-se também medir a amplitude das ondas através de um nível. Aqui já se conseguiu estabelecer uma analogia entre ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas, que era um dos propósitos deste projeto.

- Forma de utilização no projeto: empregada durante o segundo encontro, a simulação permitiu, de forma coerente, que se comparasse os resultados obtidos numa cuba d'água (como, por exemplo, a Figura 5.1), montada para a aula, com os auferidos através de meios computacionais. Desse modo, a simulação transmitiu confiança aos estudantes, que puderam comparar os resultados reais e simulados e verificar que ambos se aproximavam bastante. Além do mais, os alunos puderam perceber a manifestação dos diversos fenômenos ondulatórios estudados na aula, e entender a importância dos mesmos, que foram discutidos no

¹⁴ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-interference. Acesso em 03/02/17.

contexto histórico que culminou com o triunfo da teoria ondulatória sobre a teoria corpuscular a respeito da natureza da luz, entre os séculos XVII e XIX.

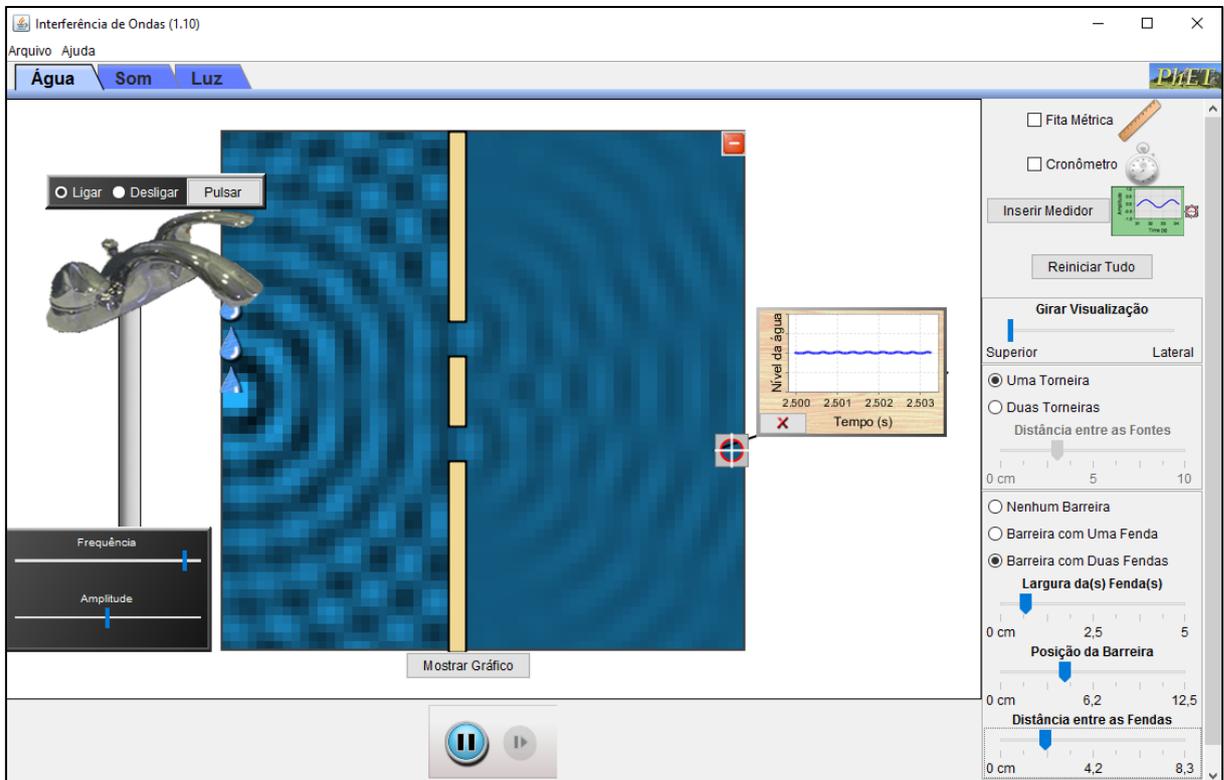


Figura 5.11: simulação computacional sobre interferência de ondas. FONTE: captura de tela.

- *Feedback* dos alunos: bastante positivo, com grande participação dos estudantes, principalmente os do 3º Ano, que além de revisitarem o tema, ainda puderam tirar algumas dúvidas que permaneciam, já com vistas aos exames de admissão do Ensino Superior que estariam por vir. Verificou-se, nesse momento, a existência do subsunçores relativos ao tema, dada a intensa interação dos alunos com o assunto.

5.7.4. Simulação computacional sobre o efeito fotoelétrico ¹⁵

- Descrição sumária: a simulação permite uma completa e ampla visualização do efeito fotoelétrico, experimento que dificilmente é encontrado em laboratórios de escolas de nível médio e fundamental, mas que é empregado em soluções tecnológicas do nosso cotidiano.
- Possibilidades educacionais: a simulação é bastante didática, pois mostra de maneira simples, porém coerente com a teoria, a interação que ocorre entre a radiação e a

¹⁵ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric. Acesso em 03/02/17.

matéria. Uma placa metálica é bombardeada com fótons, resultando na ejeção de elétrons, que por sua vez podem ser direcionados por um campo elétrico. Também é possível simular efeitos e diferenças quando se altera a intensidade da radiação e o seu comprimento de onda. Ainda pode-se mudar o material do alvo, escolhendo entre seis metais diferentes. A velocidade dos elétrons ejetados pode ser alterada através de um ajuste no potencial do circuito que pode se estabelecer. Por fim, são gerados gráficos que ajudam a entender o porquê de haver uma frequência de corte, além de auxiliarem a visualização do comportamento de variáveis como corrente, intensidade e frequência da radiação, entre outros.

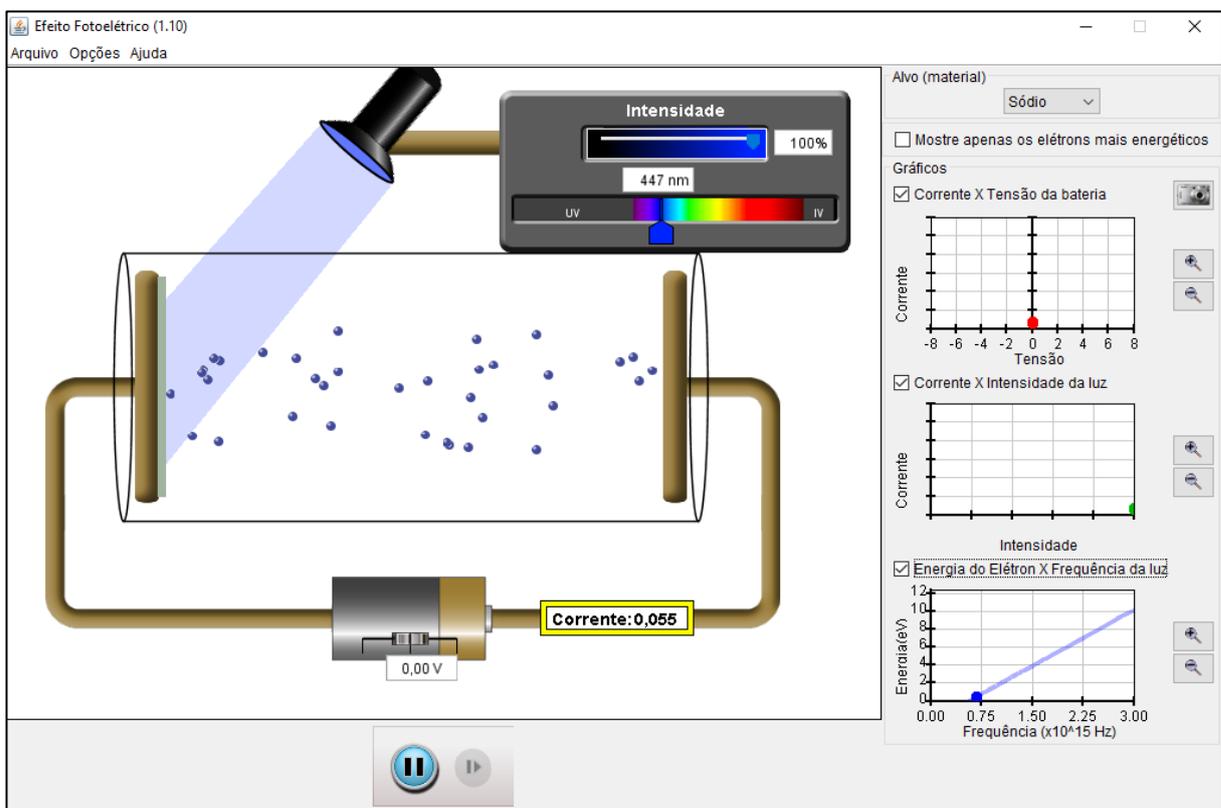


Figura 5.12: simulação computacional sobre o efeito fotoelétrico. FONTE: captura de tela.

- Forma de utilização no projeto: a simulação foi empregada na porção final do segundo encontro, sendo fundamental para o entendimento do efeito fotoelétrico por parte dos alunos, e permitindo que os mesmos compreendessem as falhas da teoria clássica, que tentava descrever o fenômeno. A partir do fracasso da Física Clássica, pode-se trabalhar as ideias propostas por Einstein para a solução do problema, deixando a teoria corpuscular da luz mais clara aos alunos. Como forma de explorar ainda mais os conceitos, os alunos foram convidados a preencher a três últimas colunas da tabela 5.3, que constava do Guia da Aula 2.

Elemento	Função trabalho (ϕ) (eV)	Frequência de corte (f_0) (Hz)	Comprimento de onda (nm)	Faixa do espectro EM
Sódio	2,28	$5,51 \times 10^{14}$	544	Visível
Zinco	4,3	$1,04 \times 10^{15}$	288	UV
Cobre	4,7	$1,14 \times 10^{15}$	263	UV
Platina	6,35	$1,54 \times 10^{15}$	195	UV
Cálcio	2,9	$7,01 \times 10^{14}$	427	Visível
Magnésio	3,68	$8,90 \times 10^{14}$	337	Visível

Tabela 5.3: função trabalho, frequência de corte e outros parâmetros de diversos metais. FONTE: o autor.

- *Feedback* dos alunos: bastante positivo e com grande participação dos estudantes, devido ao bom debate estabelecido para discutir as diferenças entre a explicação clássica do fenômeno e a proposta de Einstein de quantização da luz.

5.7.5. Simulação computacional sobre o experimento de Davisson-Germer¹⁶

- Descrição sumária: a simulação auxilia o entendimento do experimento conduzido por Davisson e Germer, cujo objetivo era testar a hipótese levantada por de Broglie, a respeito do comportamento ondulatório da matéria, além de simular o fenômeno da difração de elétrons.

- Possibilidades educacionais: no intuito de internalizar o conceito da dualidade onda-partícula na estrutura cognitiva dos alunos, a simulação é uma excelente ferramenta de apoio, pois seu resultado ajuda a convencer os estudantes sobre a validade da teoria, a despeito da desconfiança de boa parte deles. A simulação consiste na emissão de um feixe de elétrons, direcionado a fim de colidir com a rede cristalina de um material qualquer. Os elétrons espalhados podem se combinar de tal maneira que o resultado seja uma figura de interferência, o que caracteriza o comportamento ondulatório da matéria. Essa figura pode ser conseguida ajustando-se os parâmetros do raio e separação atômica, além da velocidade e da quantidade de elétrons do feixe incidente.

- Forma de utilização no projeto: a simulação foi apresentada durante o terceiro encontro, e tentou convencer os estudantes a respeito da natureza ondulatória da matéria, ideia completamente nova para a grande maioria. Também foi mais uma evidência de que a teoria

¹⁶ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/davisson-germer. Acesso em 03/02/17.

quântica, quase como um todo, foi inicialmente formulada com base em evidências indiretas, e depois corroborada através de experimentos mais específicos, indo na contramão do pensamento científico que orientava a Física Clássica.



Figura 5.13: simulação computacional sobre o experimento de Davisson-Germer. FONTE: captura de tela.

- *Feedback* dos alunos: positivo, mas sem haver muita discussão, talvez pelo fato de que a constatação do caráter ondulatório da matéria tenha soado de maneira estranha aos alunos, uma vez que ia contra suas percepções de mundo. Como também estavam sendo recém apresentados às estranhezas quânticas, o conceito pode ter parecido um tanto insipiente.

5.7.6. Simulação computacional sobre o experimento de interferência quântica¹⁷

- Descrição sumária: a simulação permite que se representem fenômenos ondulatórios e corpusculares sobre partículas, tanto sob a perspectiva clássica quanto sob a

¹⁷ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference. Acesso em 03/02/17.

quântica, dependendo do modo como se encare o experimento. Permite, também, simular a emissão de uma única partícula por vez.

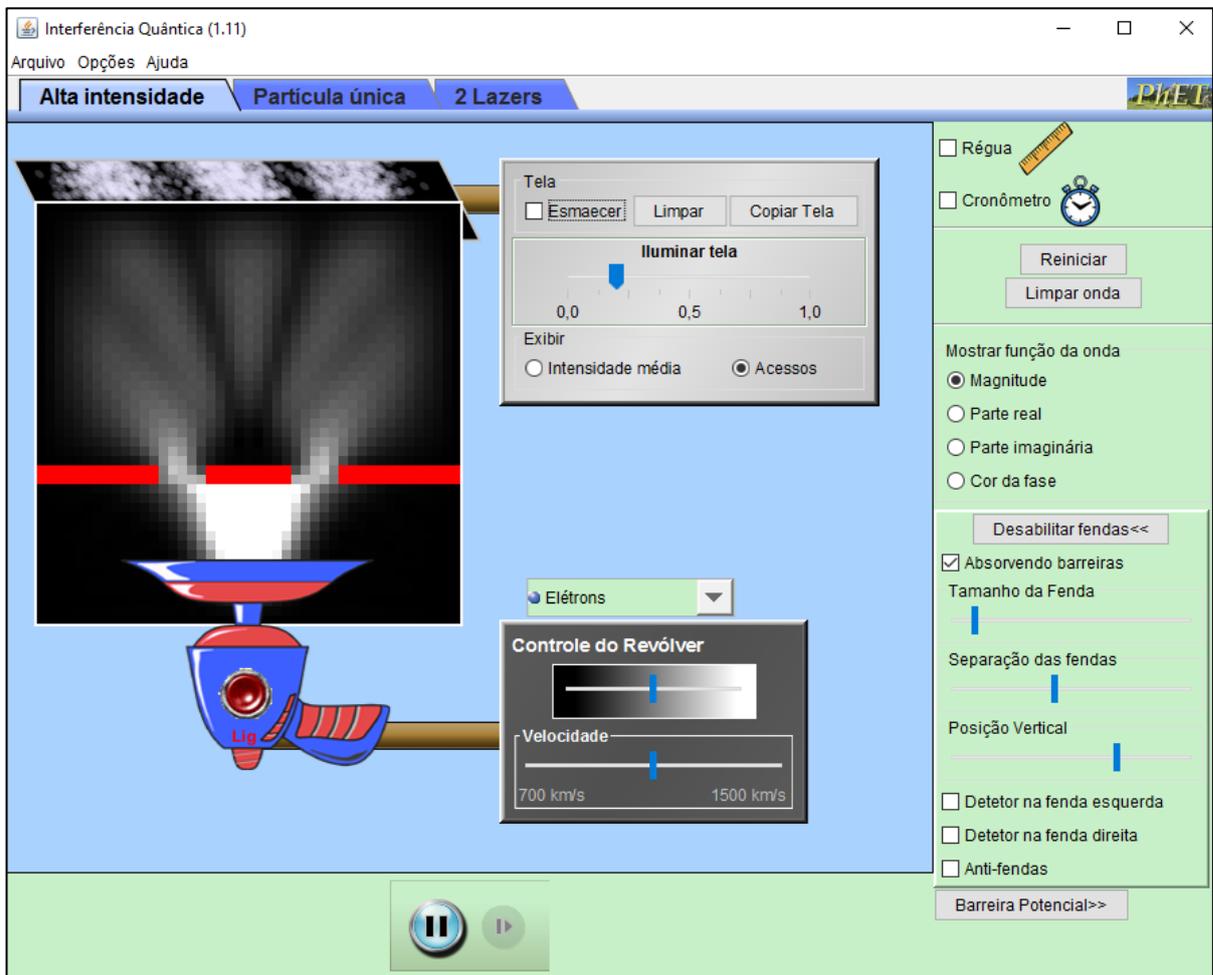


Figura 5.14: simulação computacional sobre o experimento de interferência quântica. FONTE: captura de tela.

- Possibilidades educacionais: a simulação tem por finalidade permitir a percepção de todos os princípios fundamentais que regem a Mecânica Quântica, pois admite, entre outros arranjos, a emissão de uma única partícula a cada vez, num experimento do tipo dupla-fenda. Poucos laboratórios no mundo possuem essa capacidade de manipulação, daí a importância da simulação. Além disso, ainda possibilita a percepção dos fenômenos quânticos na configuração de várias partículas simultâneas, a exemplo da borracha quântica. Pode-se ainda trabalhar com diferentes partículas, como fótons, elétrons, nêutrons ou átomos de hélio, e perceber as semelhanças e diferenças. Os obstáculos disponíveis podem ser do tipo dupla-fenda ou barreira de potencial, havendo ampla possibilidade de configuração de seus parâmetros. No caso da dupla-fenda, pode-se instalar detectores nas mesmas, a fim de entender o que acontece quando se tenta medir a onda. A simulação ainda permite que se copie a tela do

anteparo, de forma a comparar como as ondas de matéria vão se formando com o decorrer do tempo, no caso da emissão de uma única partícula por vez, como mostrado na Figura 5.15. Nela, pode-se perceber a formação das franjas de interferência nos seis primeiros quadros, obtidos em intervalos regulares com a simulação, seguida da comparação com o padrão esperado ao longo do tempo, constante do último quadro.

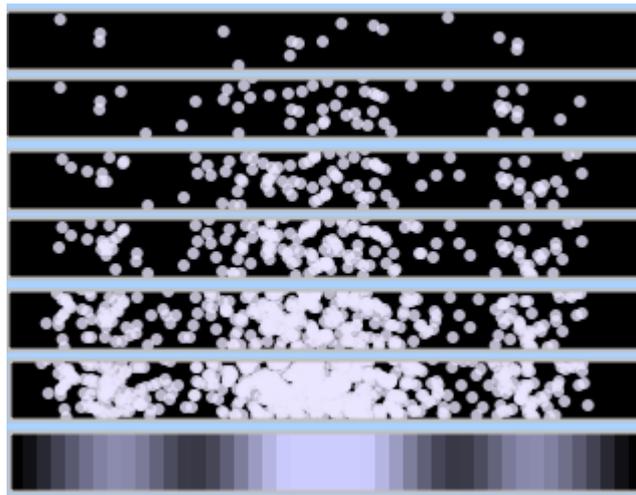


Figura 5.15: formação das ondas de matéria no anteparo, ao longo do tempo. FONTE: captura de tela.

- Forma de utilização no projeto: a simulação sobre a interferência quântica foi a mais utilizada durante o projeto. Ela apareceu pela primeira vez durante o terceiro encontro, após ser apresentado o conceito das ondas de matéria. Como forma de convencer os alunos daquilo que se estava tentando ensinar, a simulação foi empregada para demonstrar o caráter ondulatório da matéria, utilizando átomos de hélio numa configuração do tipo dupla-fenda. O aparecimento das franjas de interferência no anteparo demonstrou a natureza ondulatória das partículas, sem que se fosse necessário abordar mais profundamente os detalhes quânticos, o que seria feito futuramente. A simulação foi exposta novamente ao término do terceiro encontro, quando os alunos tiveram o primeiro contato com os princípios fundamentais da Mecânica Quântica. Nesse momento, tentou-se exemplificar cada um dos princípios, sob a perspectiva do experimento da dupla-fenda com partículas (fótons e elétrons). Os alunos puderam ver o aparecimento das franjas de interferência, quando se tratou o problema sob o ponto de vista de onda, e o desaparecimento deste padrão, quando da interpretação do fenômeno como partícula. Esse fato, que materializa os princípios tratados, causou espanto e perplexidade nos alunos, que ainda estavam reticentes em aceitar todos aqueles conceitos estranhos tratados até então. Por fim, no intuito de integrar ainda mais aqueles novos conhecimentos à estrutura cognitiva dos alunos, optou-se por apresentar novamente a simulação, desta vez no decorrer do

quarto encontro, após a discussão do experimento mental do gato de Schrödinger, e logo antes da exposição do experimento da borracha quântica, oportunidade em que foram novamente discutidos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica, de maneira cada vez mais aprofundada.

- *Feedback* dos alunos: extremamente positivo, com intensas discussões, inclusive entre os colegas. Os alunos que conseguiram compreender os conceitos se dispuseram a ensinar os demais, tamanha foi a euforia que tomou conta desses por ter começado a entender aquele estranho mundo que ora se apresentava. Além disso, em todas as ocasiões foi possível testemunhar o interesse dos estudantes pelo assunto, e perceber como a dúvida e a desconfiança sobre o tema convertiam-se, pouco a pouco, em aprendizado e clareza de ideias.

5.7.7. Simulação computacional sobre os modelos do átomo de hidrogênio¹⁸

- Descrição sumária: a simulação consiste basicamente na representação de um átomo de hidrogênio, iluminado por luz branca ou monocromática. A partir daí, pode-se realizar uma comparação do resultado experimental desse processo com as diversas teorias adotadas para a explicação do modelo atômico.

- Possibilidades educacionais: a simulação permite que se comparem os modelos atômicos, historicamente adotados pela ciência, em ordem cronológica: os modelos clássicos da bola de bilhar de Dalton, do pudim de passas de Thomson e do sistema solar de Rutherford, o modelo semiclássico de Bohr, e os modelos quânticos de Heisenberg e de Broglie, e de Schrödinger. Cada modelo é mostrado num diagrama onde, dependendo do escolhido, pode-se visualizar o comportamento do átomo segundo o modelo, seus níveis de energia (nos modelos mais recentes), e os fótons emitidos pelo átomo devido à interação com a radiação, por meio de um espectrômetro. Entretanto, a grande possibilidade da simulação é seu poder de comparação. Pode-se explorar as diferenças entre os modelos, as falhas apresentadas por cada um, e discutir como se deu a construção do conhecimento científico, com avanços e retrocessos, para que hoje se tenha um modelo teórico muito mais completo, além de bastante condizente com a realidade observada.

- Forma de utilização no projeto: a simulação foi empregada no terceiro encontro, como forma de dar suporte aos conteúdos repassados aos alunos naquele momento. Após a discussão acerca do princípio da incerteza de Heisenberg, e apoiado em de Broglie, viu-se a

¹⁸ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/hydrogen-atom. Acesso em 03/02/17.

necessidade da inserção de um novo modelo atômico que atendessem aos novos conceitos balizadores da Física naquele momento. Dessa forma, foi discutido com maior ênfase o modelo intitulado “deBroglie” (pela simulação), mas sem que se perdesse a oportunidade de revisar os modelos anteriores, que apesar de incompletos e sem atualidade biológica, têm bastante importância no entendimento de como se dá a evolução dos conceitos da ciência como um todo. O modelo de Schrödinger, último e mais completo, deixou de ser abordado por necessitar de alguns subsunçores que os alunos ainda não possuíam.

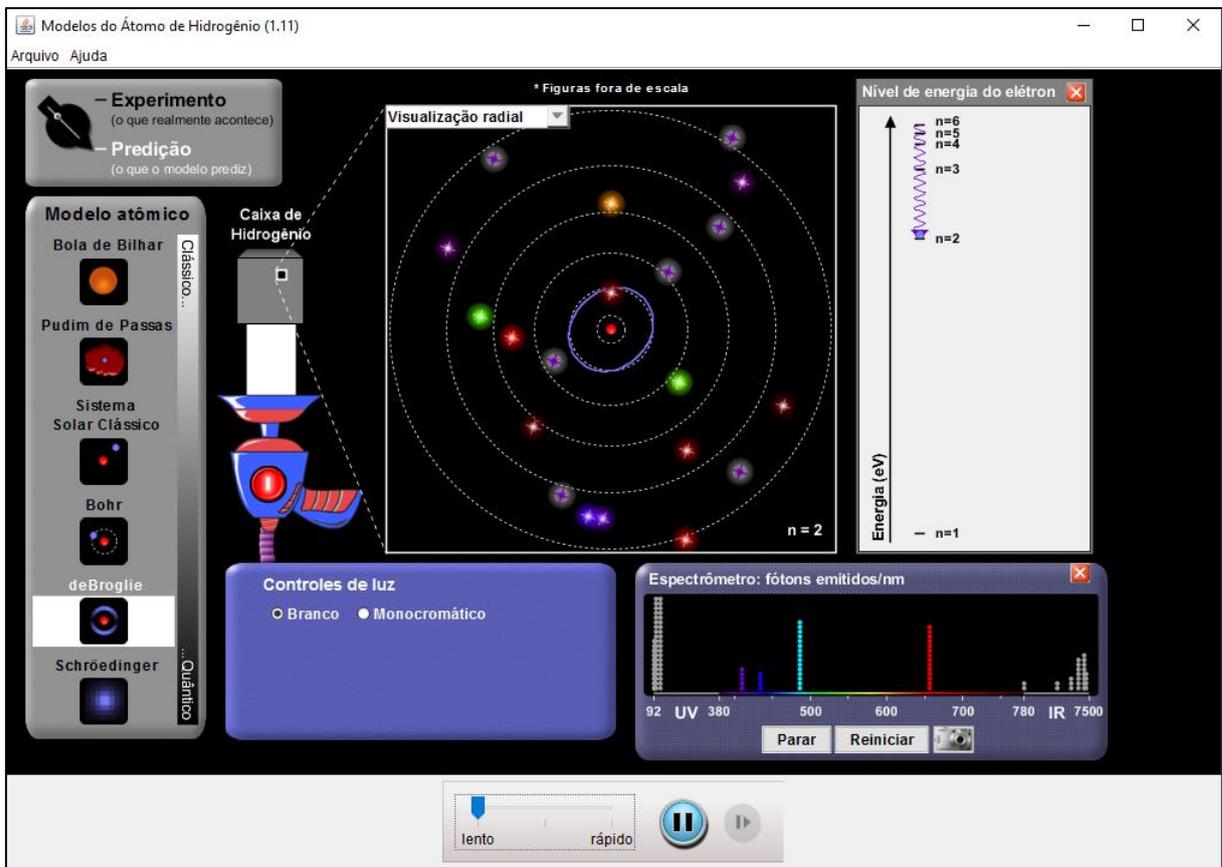


Figura 5.16: simulação computacional sobre os modelos do átomo de hidrogênio. FONTE: captura de tela.

- *Feedback* dos alunos: extremamente positivo, com boa participação principalmente dos alunos do 3º Ano, pois os modelos atômicos anteriores já faziam parte do arcabouço intelectual desse universo de estudantes. Para eles, essa foi uma boa oportunidade de relembrar aqueles conceitos, e até de sanar algumas dúvidas que ainda existiam, já com vistas aos exames de admissão ao Ensino Superior, uma aspiração da esmagadora maioria dos estudantes.

5.7.8. Simulação computacional sobre o tunelamento quântico¹⁹

- Descrição sumária: a simulação permite um entendimento mínimo do fenômeno do tunelamento quântico, sem que seja preciso recorrer à descrição matemática do fenômeno, através da exibição de um diagrama que descreve a configuração da energia, e de gráficos da função de onda e da probabilidade de uma partícula ultrapassar uma barreira de potencial maior que sua própria energia.

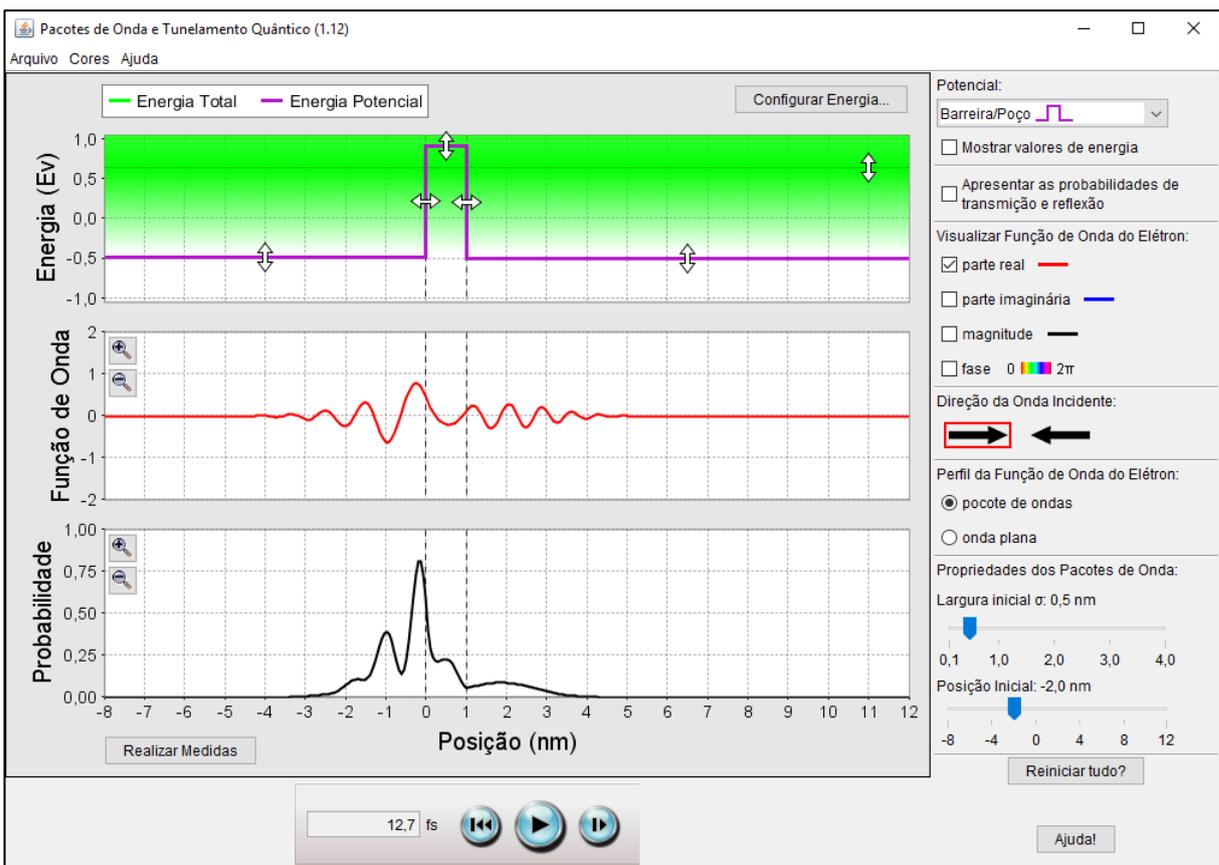


Figura 5.17: simulação computacional sobre o tunelamento quântico. FONTE: captura de tela.

- Possibilidades educacionais: a simulação é uma eficiente ferramenta de ensino, uma vez que facilita o entendimento do tunelamento sem que se recorra à sua descrição matemática, cujo resultado é uma das soluções possíveis para a equação de Schrödinger no caso de uma partícula confinada num poço de potencial finito (ou outros obstáculos configuráveis). Esta descrição necessita de um alto grau de abstração matemática por parte dos alunos, e que não faria sentido nesta proposta de ensino. A simulação permite diversas possibilidades de configuração para a energia da partícula e da barreira de potencial, de forma a contemplar várias situações. Uma vez configurada a energia, no diagrama mais acima, são apresentados, nos

¹⁹ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-tunneling. Acesso em 03/02/17.

gráficos abaixo, os comportamentos da função de onda equivalente, que pode se referir a uma onda plana ou um pacote de ondas, e da probabilidade de tunelamento da partícula naquela situação. Pode-se, ainda, perceber as probabilidades de transmissão e reflexão da onda, a direção de propagação da mesma, e os valores da energia. Além de facilitar o entendimento, a simulação auxilia sobremaneira o professor que não possui grandes habilidades de desenho, sobretudo com relação a projeção de dados em mais de um gráfico, como é esse caso.

- Forma de utilização no projeto: a simulação foi empregada no quinto encontro, como forma de auxiliar o entendimento do fenômeno do tunelamento quântico por parte dos alunos, uma vez que o tratamento matemático do mesmo não caberia neste projeto, conforme justificado anteriormente. Nessa perspectiva, a simulação foi uma excelente ferramenta de ensino, pois propiciou aos estudantes um entendimento conceitual mínimo do fenômeno, que além de inesperado é bastante contra intuitivo. Das diversas configurações possíveis, a mais explorada foi a barreira de potencial, pois representava o que ocorre com o microscópio de varredura por tunelamento, exemplo citado e explorado para ilustrar o fenômeno.

- *Feedback* dos alunos: bastante positivo, com participação da maioria dos alunos. A curiosidade dos mesmos em relação ao fenômeno manifestou-se principalmente com relação à probabilidade de haver o tunelamento, o que era contra intuitiva, mas ficava bastante clara no gráfico localizado na parte inferior da simulação.

5.7.9. Cuidados na utilização de simulações computacionais no Ensino de Física

Apesar de constituir um dos pilares desta proposta de ensino, o emprego de simulações computacionais no Ensino de Física demanda certos cuidados por parte do professor. Alguns aspectos epistemológicos importantes sobre tal metodologia, incentivada em diversos momentos deste trabalho, devem ser levados em consideração no momento da abordagem das simulações. O primeiro deles, e talvez o mais fundamental, diz respeito à modelagem utilizada na confecção da simulação: toda simulação computacional é baseada em um modelo matemático. Um bom modelo deve ser simples a capaz de fazer boas previsões. Além disso, ele necessariamente aproxima e simplifica a realidade do fenômeno estudado, jamais devendo ser confundido com a situação física real. Essas aproximações e simplificações são fundamentais para a elaboração do modelo, uma vez que a realidade envolve um grande número de variáveis, nem sempre fundamentais para o entendimento de determinado fenômeno. No entanto, por vezes tais pressupostos não são percebidos pelos estudantes (e até mesmo pelos

professores), o que pode levá-los a crer que uma simples animação é uma cópia fiel do fenômeno físico real.

Também importa ressaltar que toda simulação computacional, por ser baseada em um modelo matemático, possui seus limites de validade. Tais limites, se não forem bem explorados, podem surtir efeitos indesejados em termos de aprendizagem. As simulações também não devem negligenciar a experimentação, pois nem sempre permitem a criação de hipóteses sobre determinada teoria explorada. Medeiros e Medeiros (2002), assim resumem esses aspectos apresentados

[...] é preciso ter-se em mente que o ponto de partida de toda simulação é a imitação de aspectos específicos da realidade, isto significando que, por mais atraente que uma simulação possa parecer, ela estará sempre seguindo um modelo matemático desenvolvido para descrever a natureza, e este modelo poderá ser uma boa imitação ou, por outras vezes, um autêntico absurdo. Uma simulação pode tão somente imitar determinados aspectos da realidade, mas nunca a sua total complexidade. Uma simulação, por isso, nunca pode provar coisa alguma. O experimento real será sempre o último juiz (p. 83).

Esta proposta de ensino considera pertinentes todos os aspectos levantados por Medeiros e Medeiros (2002). Entretanto, particularmente na articulação de tópicos de FMC no Ensino Médio, onde a maioria dos experimentos reais inexitem em laboratórios de Física (que boa parte das escolas, infelizmente, não possui), entende-se que a melhor saída seja o emprego de simulações computacionais oriundas de fontes confiáveis, como, por exemplo, o *PhET*.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo destina-se a debater os resultados alcançados nos testes aplicados no início e no fechamento do projeto. Inicialmente, serão discutidas as questões constantes do Teste Inicial (Apêndice E), que somava 6 itens. As questões 1, 2, 5 e 6 pretendiam mapear quais dos subsunçores relacionados às teorias ondulatória e corpuscular mostravam-se presentes na estrutura cognitiva dos alunos. Já as questões 3 e 4 possuíam um caráter voltado aos métodos de aprendizagem, e foram baseadas na metodologia utilizada no trabalho de Cardoso e Dickman (2012). O Teste Final, por sua vez, era composto por 10 questões, sendo que as 6 primeiras foram avaliadas de maneira formal, servindo de componentes para o conceito final dos estudantes e como instrumento estatístico para verificação da aprendizagem. Os outros 4 itens serviram de subsídio para a pesquisa, onde se pode comparar as respostas de algumas questões presentes em ambos os testes. Nessas, especificamente, tentou-se inferir algumas conclusões a respeito do processo de ensino-aprendizagem, a fim de verificar se houve indícios de aprendizagem significativa numa amostragem de quatro alunos, sendo um de cada ano letivo.

6.1 Teste Inicial

O Teste Inicial foi a primeira atividade desenvolvida no projeto. Sua aplicação ocorreu no primeiro encontro, dia 5 de setembro de 2016, na primeira hora de aula. A principal finalidade da verificação foi prospectar quais dos subsunçores estudados ao longo do projeto se encontravam, ainda que minimamente, presentes na estrutura cognitiva dos alunos. As questões constantes do teste são analisadas a partir de agora.

O objetivo da Questão 1 era verificar se os estudantes conseguiam estabelecer diferenças entre fenômenos de natureza ondulatória e corpuscular. Para tanto, foram apresentados aos alunos 12 termos relacionados a esses fenômenos, e solicitou-se que os mesmos os classificassem pela letra “P”, se considerassem que aquele fenômeno era característico de uma

partícula, ou “O”, caso entendessem que o termo tinha relação com uma onda. A distribuição das respostas é apresentada em percentuais no Gráfico 6.1.

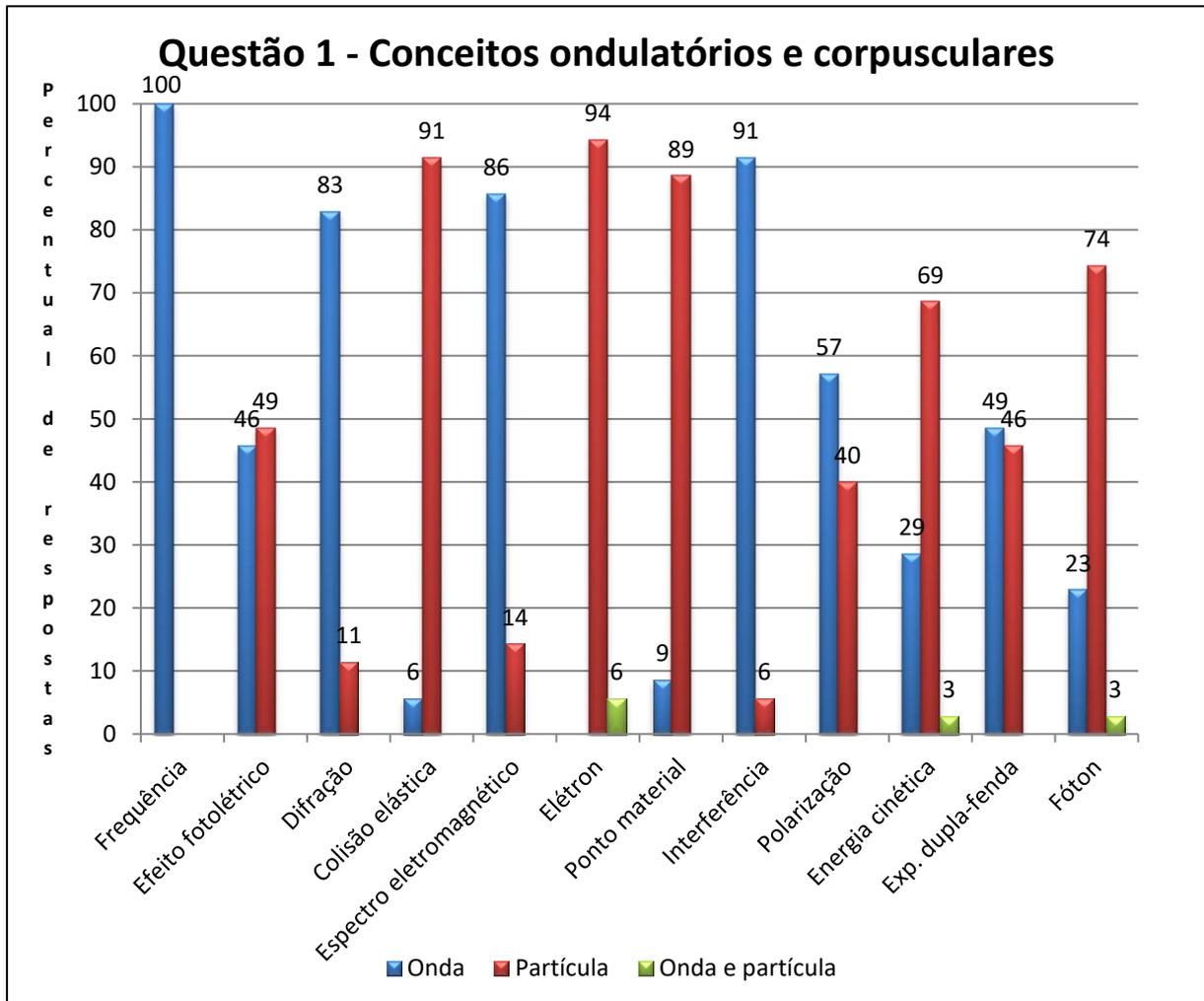


Gráfico 6.1: distribuição das respostas da Questão 1 do Teste Inicial. FONTE: o autor.

Analisando o Gráfico 6.1, percebe-se que todos os alunos relacionaram corretamente o termo “frequência” com a natureza ondulatória, inclusive os 6 estudantes do 9º e 1º anos. Apesar dos currículos escolares desses anos não contemplarem uma discussão aprofundada da mecânica ondulatória, que ocorre apenas no 2º Ano, o 9º Ano tem um breve contato com o tema através da disciplina Ciências Físicas e Biológicas, o que pode explicar o índice máximo de acerto do termo. Já os termos “difração”, “espectro eletromagnético” e “interferência”, também de natureza ondulatória, obtiveram índices superiores a 80% de acerto, o que denota uma boa compreensão, por parte dos alunos, da relação desses fenômenos com as ondas. Os termos “colisão elástica”, “elétron” e “ponto material”, por sua vez, obtiveram índices parecidos no tocante à característica corpuscular. Assim, 7 dos 12 termos foram respondidos de maneira correta por, ao menos, 80% dos alunos, o que constitui um bom índice para que se afirme que

havia bons indícios de que os subsunçores desses termos estavam presentes na estrutura cognitiva da turma como um todo.

Entretanto, alguns termos não gozaram desses elevados índices anteriormente descritos. Um deles foi a polarização, característica inerente a uma onda, e teoricamente do conhecimento de mais de 80% dos estudantes, que no 2º Ano visitaram o assunto. A distribuição quase equitativa das respostas mostrou que o subsunçor não estava bem estabelecido e deveria ser reforçado, o que aconteceu durante as aulas do projeto, até mesmo por sua importância no contexto do experimento da borracha quântica. Além disso, pode-se considerar que a polarização seja, de todas as características das ondas, talvez a menos empregada no cotidiano de uma pessoa comum. Esse fato, atrelado a uma possível aprendizagem mecânica (MOREIRA, 2014), pode ter contribuído para que se obtivesse essa distribuição de respostas. O termo “energia cinética”, por sua vez, apesar de atingir um índice de quase 70% de acerto, obteve cerca de 30% de respostas incorretas, índice considerado alto, uma vez que grande parte dos estudantes tem contato com o termo desde o início de sua caminhada no Ensino Médio. O que pode ter acontecido foi uma confusão entre o termo “energia cinética”, dependente da massa de uma partícula, com a energia de uma onda, que depende do quadrado do módulo do campo associado à onda. Mas isto é apenas uma conjectura.

Os termos efeito fotoelétrico e experimento da dupla-fenda obtiveram percentuais quase idênticos de respostas “onda” e “partícula”. Esse resultado era esperado, uma vez que esses termos não estão presentes nos currículos de Física Clássica do Ensino Médio. Nem mesmo os alunos do 3º Ano, cujos currículos são contemplados com tópicos de FMC, haviam tido contato com os termos. Dessa forma, percebe-se que os dados estatísticos desses dois termos, apesar do pequeno universo considerado, apontam para uma distribuição bastante equitativa das duas respostas, e com isso demonstram que os subsunçores ligados a esses temas ainda não existiam na estrutura cognitiva desses estudantes. Verificou-se, então, a necessidade de formar esses subsunçores, o que se tentou fazer durante as aulas seguintes.

Surpreendeu o percentual de 74% de respostas que consideravam o fóton como uma partícula, contra 23% que o classificavam como onda. Acredita-se que a maioria dos alunos optou por essa resposta pelo fato que, em algum momento da sua vida escolar, tiveram contato com esse termo como sinônimo de uma partícula de luz, através de algum professor, livro, revista ou por meio de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs). Entretanto, apenas um aluno, do 3º Ano, respondeu corretamente ao termo, considerando o fóton como sendo onda e partícula. Curiosamente, o mesmo aluno respondeu de maneira semelhante o termo “elétron”,

assim como outro estudante do 1º Ano. A explicação para essas respostas pode estar no fato desse aluno do 3º Ano ser participante assíduo do Clube de Física do Colégio. Infelizmente, pelos motivos expostos no Capítulo 4, o aluno compareceu apenas ao primeiro encontro, tendo priorizado outras atividades que desenvolvia no âmbito do Colégio.

Finalizando a análise da Questão 1, é interessante ressaltar que pouquíssimos alunos deixaram de responder alguns dos termos solicitados. Esses alunos foram justamente os do 9º Ano, talvez pelo fato de simplesmente não saberem a resposta correta, e também por optarem em deixar a questão em branco, ao invés de colocar qualquer resposta ao acaso, atendendo solicitação contida no Teste Inicial.

A Questão 2 foi proposta para averiguar se o subsunçor ligado ao conceito matemático da probabilidade estava de alguma forma presente no sistema cognitivo dos alunos. Esse tema foi especialmente escolhido porque é um dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica que seriam apresentados aos estudantes, por ocasião da exposição do experimento da borracha quântica. O Gráfico 6.2 mostra a distribuição das respostas da Questão 2. A resposta correta é a opção “E”.

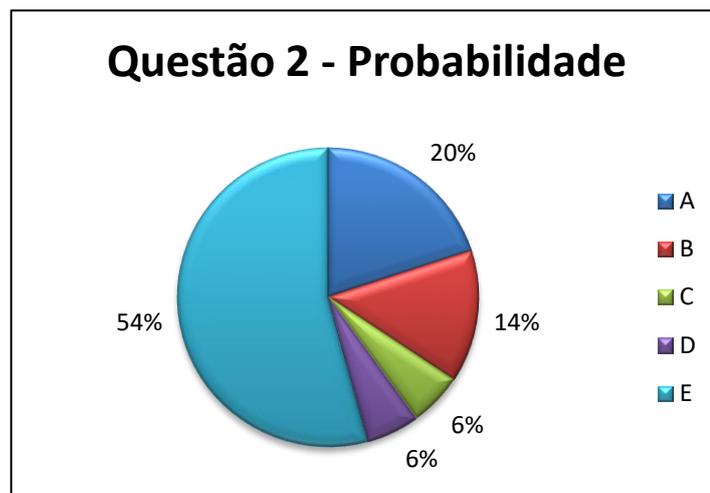


Gráfico 6.2: distribuição das respostas da Questão 2 do Teste Inicial. FONTE: o autor.

Como se pode perceber, pouco mais da metade dos alunos acertou a questão. Dos que erraram, apenas um aluno não era do 3º Ano, o que causou certa surpresa, pois imaginava-se que estes alunos, devido à sua maturidade e bagagem intelectual, não teriam problemas nesse tema. Por outro lado, sabe-se também que nossos estudantes, como um todo, têm uma grande dificuldade na área de exatas, principalmente na matemática, como mostram várias pesquisas e índices de educação no Brasil, como o IDEB (Índice de Desenvolvimento da Educação Básica) e o Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM). Dessa forma, achou-se por bem reforçar esse subsunçor, a fim de contornar a dificuldade apresentada.

A Questão 5 foi pensada como forma de obter o modelo atômico que os alunos imaginavam prevalecer. A proposta foi que os estudantes fizessem um esboço do átomo, de acordo com a ideia que tinham dele, representando e identificando suas partes. Por ser uma questão aberta, as respostas foram bastante variadas. Dessa forma, tentou-se classificar essas respostas de acordo com os modelos históricos adotados desde o século XIX, baseado nas características de cada esboço.

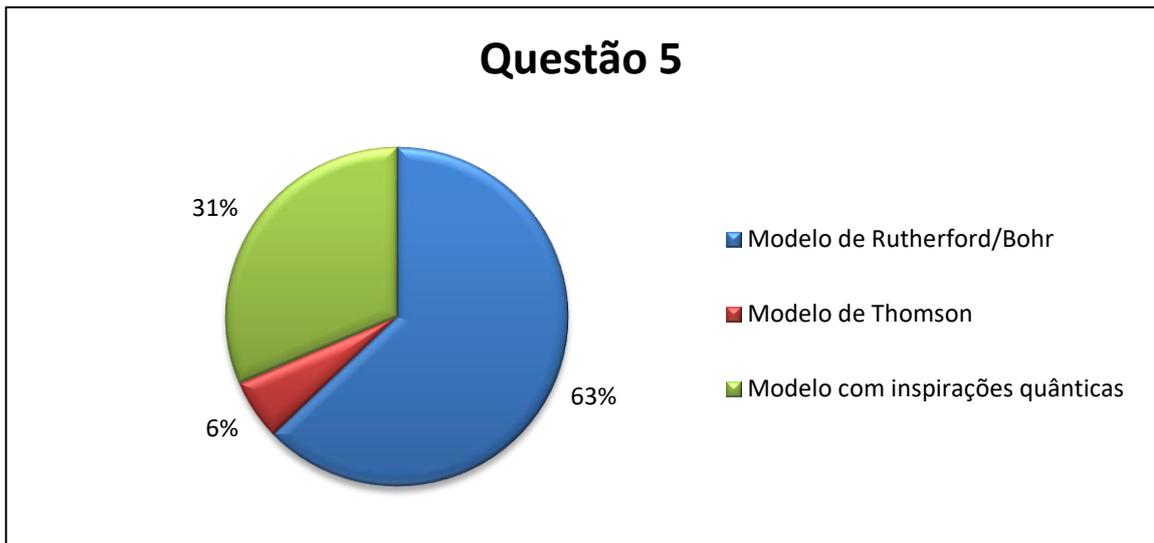


Gráfico 6.3: distribuição das respostas da Questão 5 do Teste Inicial. FONTE: o autor.

O Gráfico 6.3 mostra a distribuição das respostas da Questão 5, onde se verifica que quase dois terços dos alunos assumiram que o átomo se comportava segundo a descrição dos modelos de Rutherford ou Bohr, assemelhando-se a um sistema planetário (órbitas estacionárias). Apenas dois alunos esboçaram átomos que se aproximavam mais do modelo conhecido como “pudim de passas”, proposto por Thomson. A Figura 6.1 traz um exemplo de esboço do modelo atômico classificado como inspirado nos modelos de Rutherford ou Bohr, à esquerda, e outro inspirado no Modelo de Thomson, à direita.

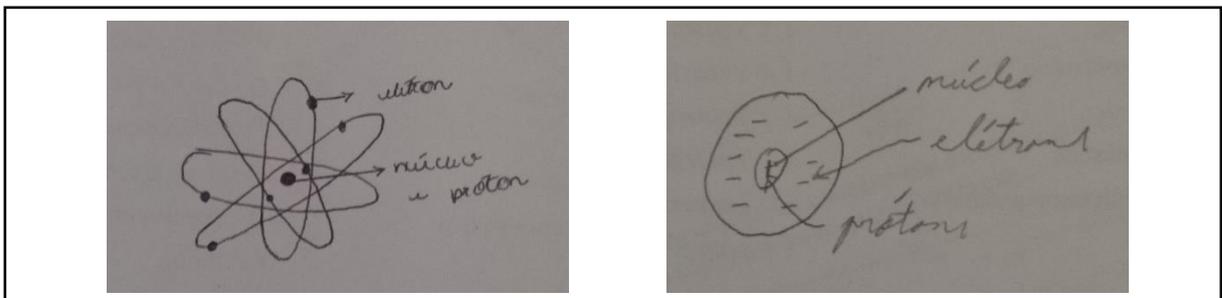


Figura 6.1: exemplo de esboços dos modelos de Rutherford/Bohr e Thomson, produzidos pelos alunos, como resposta à Questão 5. FONTE: o autor.

Um terço dos alunos, entretanto, esboçou sua percepção do modelo atômico segundo alguma inspiração quântica. Utilizou-se o termo inspiração porque os alunos tentaram, de alguma forma e sem explicar o porquê, esboçar um átomo que levava em conta algum fundamento quântico, mesmo que os estudantes não se dessem conta disso. Essa inspiração pode ser percebida pela maneira como os alunos representaram o átomo, principalmente através de legendas escritas, descrições do esboço ou com desenhos que buscavam expressar suas concepções. A Figura 6.2 apresenta dois exemplos de esboços classificados como de inspirações quânticas, um que se expressaram melhor através de legendas, e outro com melhor detalhamento do próprio esboço.

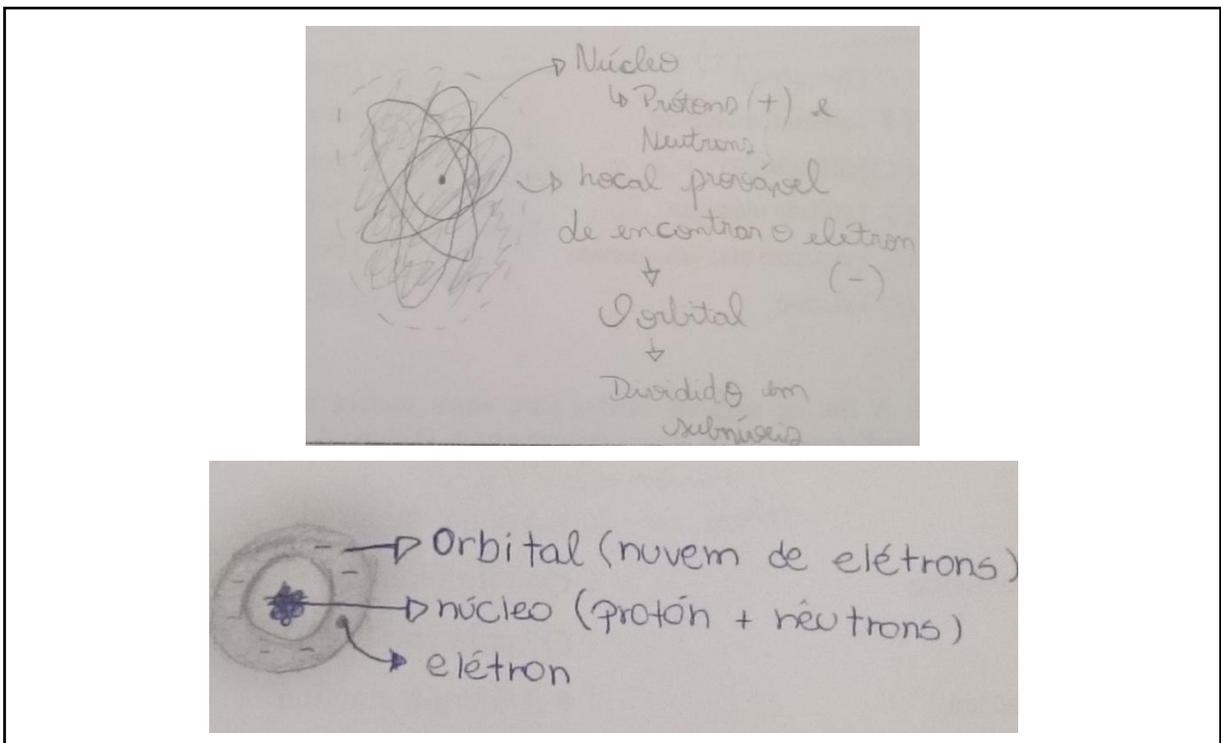


Figura 6.2: exemplo de esboços de modelos com inspirações quânticas, produzidos pelos alunos, como resposta à Questão 5. FONTE: o autor.

Finalizando as questões relacionadas à Física, a de número 6 propôs que os alunos representassem, no espaço destinado para tal, os conceitos da Mecânica Quântica que de alguma forma eram de seu conhecimento e, se possível, que estabelecessem uma relação gráfica entre eles. Essa relação poderia ser feita através de setas, hierarquização, organogramas ou o que a imaginação dos alunos permitisse. A intenção da questão era formar um quadro do que os alunos imaginavam da Mecânica Quântica, e que se aproximasse de algo entre um mapa mental e um mapa conceitual. Por volta de 50% dos alunos estabeleceu a relação solicitada. Para fins de comparação, e na tentativa de se entender como era naquele momento a organização do

conhecimento na estrutura cognitiva dos alunos, e como ela evoluiu ao longo do processo, essa mesma questão também foi incluída no Teste Final. Assim, por uma questão de praticidade, a análise das respostas do Teste Inicial aparecerá junto às do Teste Final, onde poder-se-á comparar as diferenças dos mapas de 4 alunos, um de cada ano de ensino, e inferir comentários a respeito desse processo de transformação do conhecimento.

Como mencionado anteriormente, as questões 3 e 4 buscaram obter informações a respeito do modo como os estudantes se preparavam para as provas e avaliações, como as resolviam, e se havia a intenção de aprender, no intuito de investigar se seus hábitos contribuíam para uma aprendizagem significativa ou meramente mecânica. A Questão 3 solicitava o método de estudo dos alunos. Por ser uma questão do tipo aberta, os alunos podiam descrever mais de uma estratégia de estudo, motivo pelo qual o Gráfico 6.4 apresenta as principais estratégias citadas, com percentuais baseados nas respostas de cada estudante.

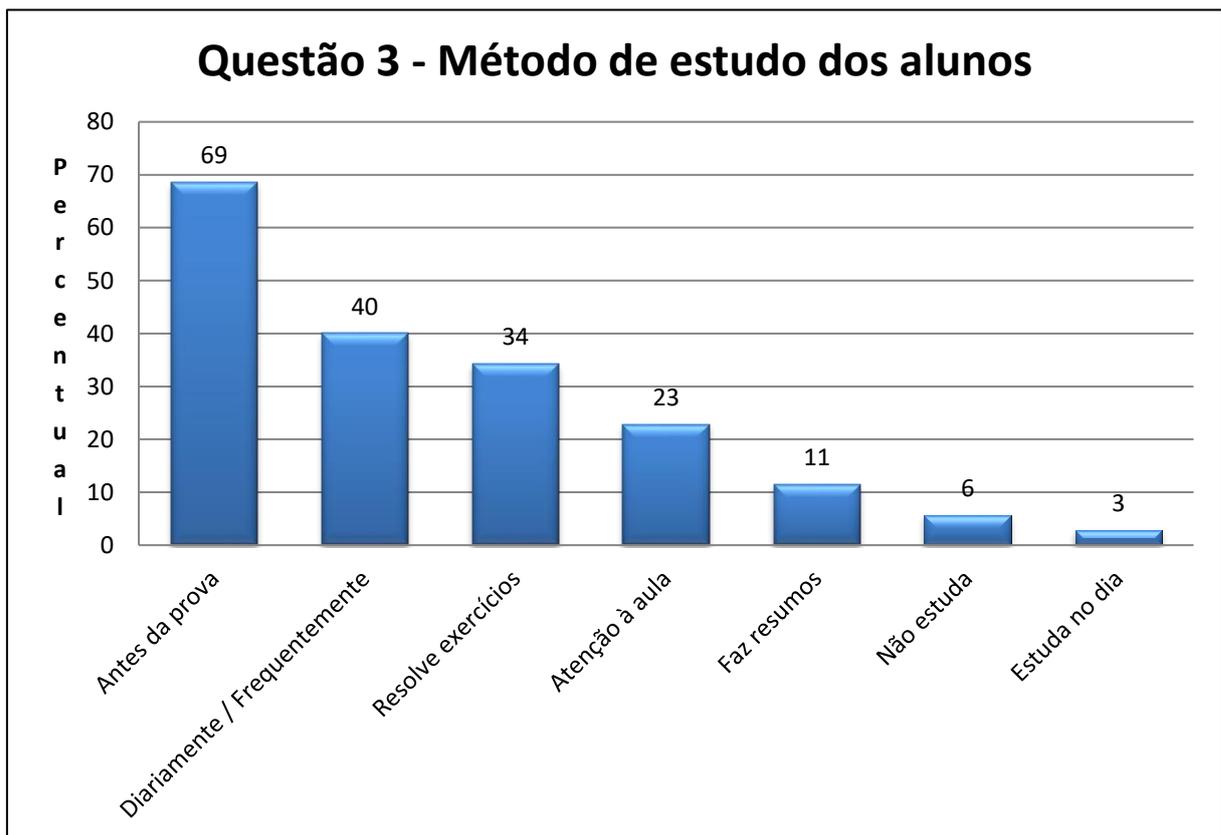


Gráfico 6.4: distribuição das respostas da Questão 3 do Teste Inicial. FONTE: o autor.

Analisando sumariamente o Gráfico 6.4, percebe-se que quase 70% dos alunos aprofundam o estudo nos dias que antecedem as provas, o que não significa necessariamente que estudem somente nesses dias, tampouco que usem esse período como intensificação do estudo diário. Esta última metodologia, por sinal, foi citada por apenas 40% dos alunos,

percentual considerado baixo. Entende-se que estudos de véspera, aparentemente, estão ligados à uma aprendizagem mecânica, enquanto que estudos diários ou frequentes, altamente desejáveis, relacionam-se mais com uma aprendizagem significativa (MOREIRA, 2014). Um terço dos alunos relatou ainda resolver exercícios como método de estudo, o que pode ser uma boa estratégia se isto incorporar os conceitos físicos existente por trás da matemática. Quase um em cada quatro estudantes relatou espontaneamente que a principal estratégia é prestar atenção às aulas, um percentual considerado interessante, já que a questão era aberta e não elencava opções. Entretanto, esperava-se que mais alunos relatassem tal prática, uma vez que a Física, e a área de exatas, requer uma interação muito acentuada entre professores e alunos devido ao elevado nível de abstração requerido, característica peculiar ao campo quando comparado a outras áreas. Por fim, pouco mais de 10% dos alunos afirmam que utilizam resumos como apoio aos estudos, o que pode ser considerado uma boa estratégia se associada à uma aprendizagem significativa, e não como forma de decorar fórmulas e conceitos. Ainda 6% disseram que simplesmente não estudam, e 3% revelaram estudar apenas no dia da avaliação.

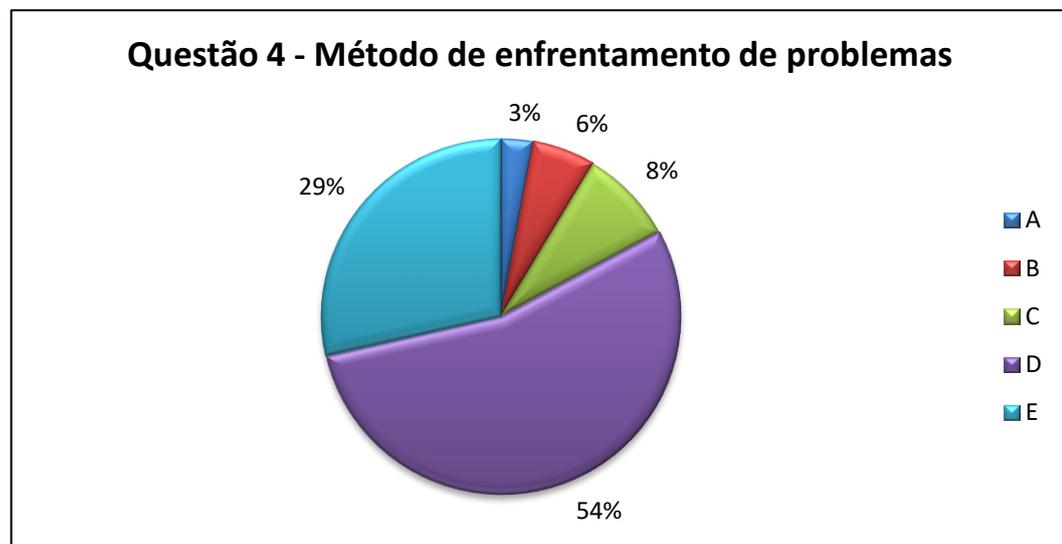


Gráfico 6.5: distribuição das respostas da Questão 4 do Teste Inicial. FONTE: o autor.

Já a Questão 4 confrontava os estudantes com uma situação que, imaginava-se, fosse comum, ou ao menos tivesse ocorrido alguma vez com boa parte deles: como resolver uma questão inédita de Física, em que o aluno jamais tivesse se deparado antes, tendo como única fonte de consulta seu próprio conhecimento. Foram apresentadas 5 alternativas a esta pergunta, e foi solicitado que os alunos escolhessem apenas uma. O resultado das escolhas dos estudantes está representado no Gráfico 6.5. Apenas 3% escolheu a opção A, “deixaria a questão em

branco, por que tenho dificuldade em Física”. Outros 6% optaram pela B, “escreveria algumas frases tentando acertar no chute”. Essas respostas não trazem nenhum indício a respeito do tipo de aprendizagem que se está pesquisando. Por outro lado, 8% escolheram a opção C, “escreveria sobre o primeiro raciocínio que tive, sem pensar muito”, e outros 29% elegeram a opção E, “buscaria responder usando as questões que já estudei em sala de aula, da mesma forma que o professor passou no quadro”. Essas duas opções, por sua vez, denotam uma forte predominância de uma aprendizagem mecânica, pois os alunos não demonstram que pretendem conciliar o seu conhecimento prévio com o novo exercício que se apresenta. Já a opção D, “tentaria escrever uma resposta coerente com algum fenômeno ou situação que já vivenciei”, foi a escolhida pela maioria, 54% dos estudantes. Essa opção foi a que mais apresentou evidências de uma aprendizagem significativa, pois os alunos se mostraram dispostos a refletir sobre o problema, procurando conectar experiências passadas com o novo desafio encontrado (MOREIRA, 2014).

6.2 Teste Final

O Teste Final foi o evento que encerrou as atividades do projeto, tendo ocorrido no dia 29 de setembro de 2016. Ele foi planejado para servir de ferramenta de avaliação dos diversos conceitos estudados, e também como instrumento de comparação entre as perspectivas inicial e final dos estudantes sobre a Mecânica Quântica. O Teste Final era composto de 10 questões, sendo que as 6 primeiras faziam parte do grau final dos alunos no projeto. As 4 questões restantes serviram de subsídio para esta pesquisa, onde especificamente em duas tentou-se verificar como se deu a modificação dos conceitos aqui estudados na estrutura cognitiva dos alunos. Inicialmente, será procedida a análise das questões de múltipla escolha que compuseram parte do conceito final dos estudantes no projeto. Por uma questão de praticidade e semelhança, as questões, de número 1 e 3, serão apresentadas conjuntamente.

A Questão 1 versava sobre as teorias a respeito da natureza da luz, que competiam entre si no fim do século XIX, e que serviu como estopim para o desenvolvimento da teoria quântica. Com 5 opções possíveis, mais de 90% dos alunos acertou o item (opção C), o que pode ser considerado um excelente e esperado resultado, haja vista que o contexto histórico foi tratado com bastante ênfase durante todas as aulas. Essa questão era contextualmente simples e de fácil compreensão, e foi colocada propositalmente no início do teste para dar confiança aos estudantes, a fim de encorajá-los a enfrentar o restante do teste. A Questão 3, por sua vez, fazia referência à dualidade onda-partícula e à teoria de Louis de Broglie. Considerada

conceitualmente mais complexa que a anterior, ainda assim a questão obteve quase 75% de acerto, o que é considerado um bom índice. Assim, quase 3 em cada 4 estudantes respondeu corretamente que se a luz possui um momentum linear, então a matéria pode apresentar características ondulatórias (opção D). Por outro lado, 18% dos alunos se equivocaram ao afirmar que o comprimento de onda de um elétron (ao invés da sua frequência) é diretamente proporcional à sua energia (opção B). O Gráfico 6.6 apresenta os resultados das questões 1 e 3.

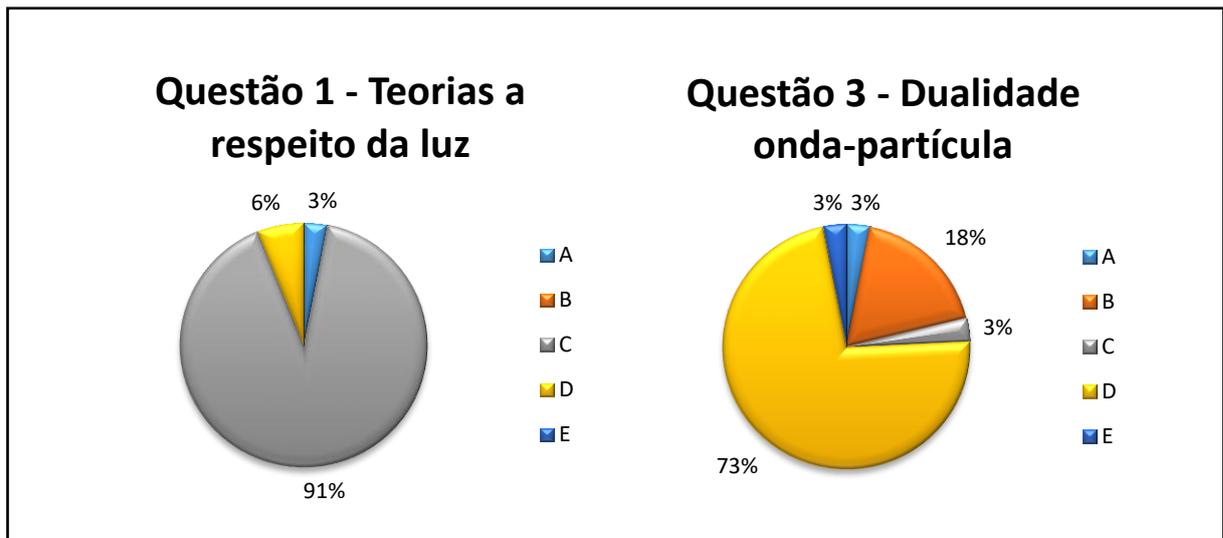


Gráfico 6.6: distribuição das respostas das questões 1 e 3 do Teste Final. FONTE: o autor.

A Questão 2 tratava sobre os dois problemas não explicados pela Física Clássica (FC) no final do século XIX, e que deram origem às ideias de quantização da radiação e da energia. Para tanto, os alunos deveriam identificar esses dois problemas, numa relação que continha 6 alternativas. O Gráfico 6.7 traz os resultados obtidos segundo os percentuais de acerto.

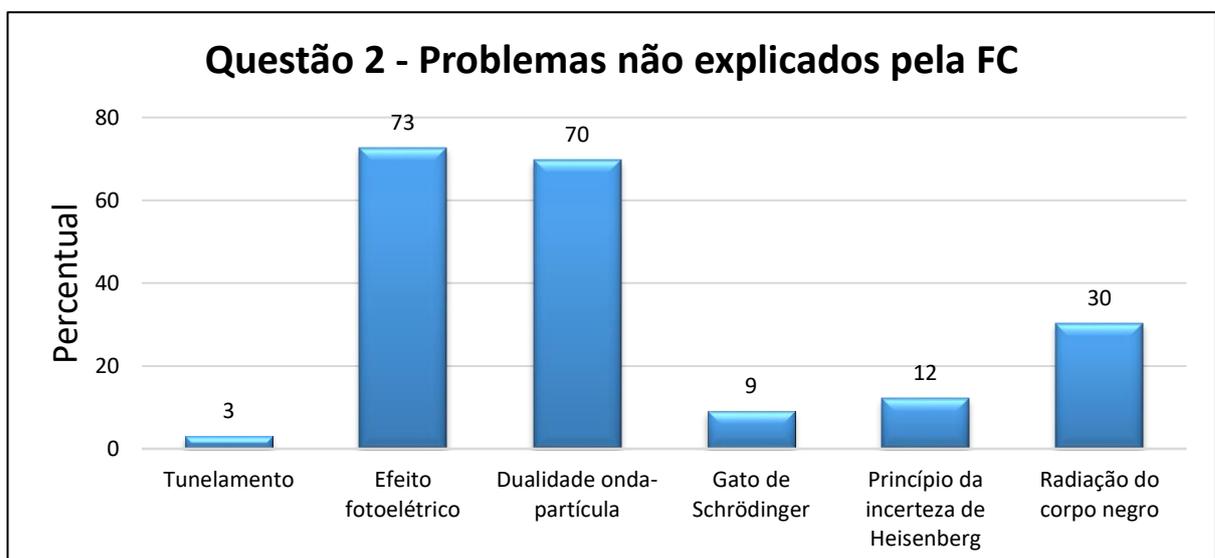


Gráfico 6.7: distribuição das respostas da Questão 2 do Teste Final. FONTE: o autor.

Um dos problemas, o efeito fotoelétrico, foi identificado de maneira correta por 73% dos estudantes, índice considerado satisfatório. Entretanto, a radiação do corpo negro, que era o outro problema, foi escolhida por apenas 30% dos alunos. A dualidade onda-partícula, uma das consequências da teoria quântica foi, erroneamente, a opção de 70% dos estudantes. Aqui tem-se bons indícios de que o subunçor ligado aos fatos que deram origem à teoria quântica não foi bem assimilado, haja vista que grande parte dos estudantes trocou o problema da radiação do corpo negro pela teoria da dualidade onda-partícula. E esse fato foi inesperado, uma vez que as respostas não têm nenhuma relação entre si e foram apresentadas em momentos distintos do projeto, sendo a radiação do corpo negro no primeiro encontro, e a dualidade onda-partícula, no terceiro.

Encerrando o rol de questões cuja ação requerida por parte dos alunos era apenas de identificação da resposta correta, a Questão 5 trazia os princípios fundamentais da Mecânica Quântica, estudados quase que exaustivamente do terceiro ao quinto encontros, e que deveriam ser relacionados corretamente com o significado físico de cada um. O Gráfico 6.8 detalha os percentuais de acerto alcançados pelos alunos em cada princípio.

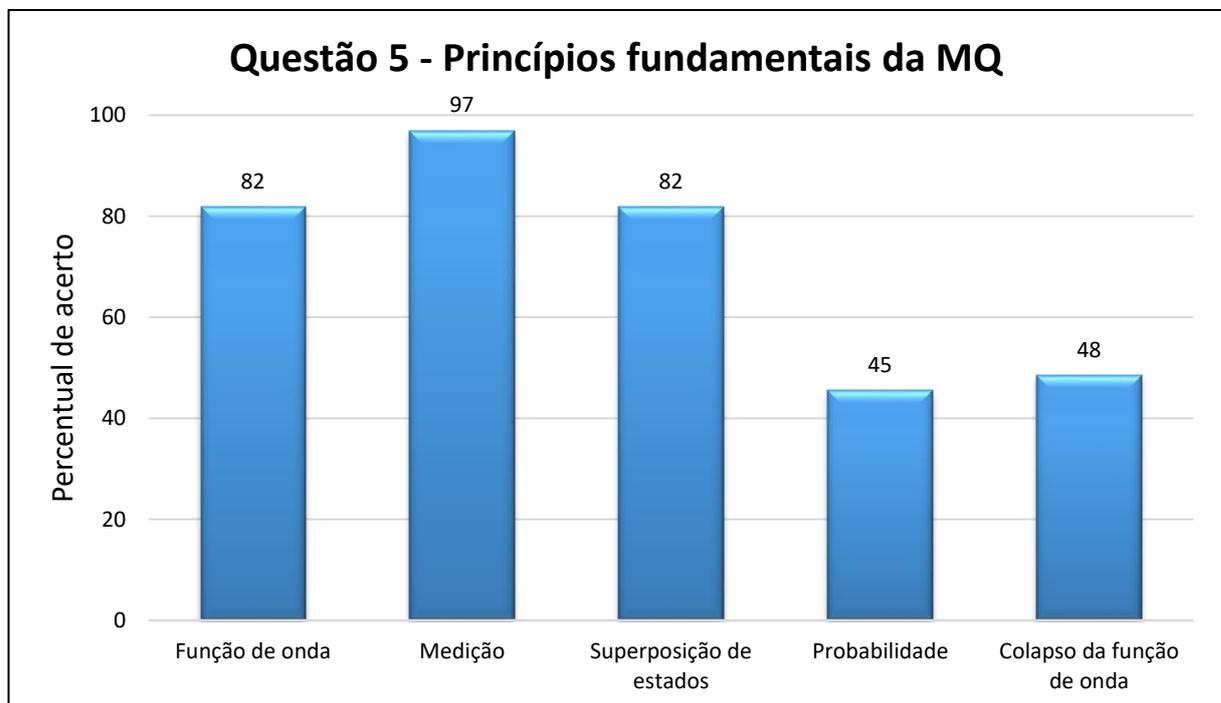


Gráfico 6.8: distribuição das respostas da Questão 5 do Teste Final. FONTE: o autor.

Como um todo, o resultado obtido pelos alunos foi considerado satisfatório, uma vez que em três dos cinco princípios o percentual de acerto foi superior a 80%, chegando a 97% no princípio que definia o ato da medição, cuja consequência imediata é a alteração do sistema

físico em estudo, segundo a Interpretação de Copenhague. Os princípios da probabilidade e colapso da função de onda atingiram níveis de acerto próximos da metade, o que não significa necessariamente que tenham sido confundidos entre si para explicar esses índices. O que pode ter ocorrido, na verdade, foi uma combinação entre as várias respostas possíveis, que culminou com o resultado apresentado no Gráfico 6.8. Mesmo assim, considera-se que, de uma maneira geral, a turma compreendeu minimamente o significado e o funcionamento dos princípios, atingindo um dos objetivos do projeto.

Finalizando a análise das questões que compuseram parte do conceito final dos estudantes, as Questões 4 e 6 desafiava-os a explicar, de maneira discursiva, alguns pontos discutidos durante o projeto. A Questão 4 solicitava, de maneira sucinta, qual o entendimento dos alunos a respeito do princípio da incerteza de Heisenberg. Como critério de correção, foram consideradas como corretas todas as respostas que, de alguma forma, mencionaram que não era possível medir, ao mesmo tempo, a posição e o momentum (ou a velocidade, também considerado correto) de uma partícula. Alguns alunos que responderam dessa forma ainda tentaram exemplificar o conceito, uns de maneira correta, outros não. Ainda assim, avaliou-se a resposta como sendo correta. Outros alunos fizeram alguma menção à resposta considerada correta, porém de modo incompleto. A estes foi consignado, por uma questão de justiça, meio score. Os alunos que não citaram nenhum termo da resposta avaliada como correta não obtiveram pontuação na questão. O Gráfico 6.9 mostra a composição final dos resultados para a questão, onde pode-se observar que praticamente metade dos alunos soube se expressar corretamente, enquanto que quase o mesmo percentual não entendeu ou não respondeu aquilo que lhe foi solicitado.

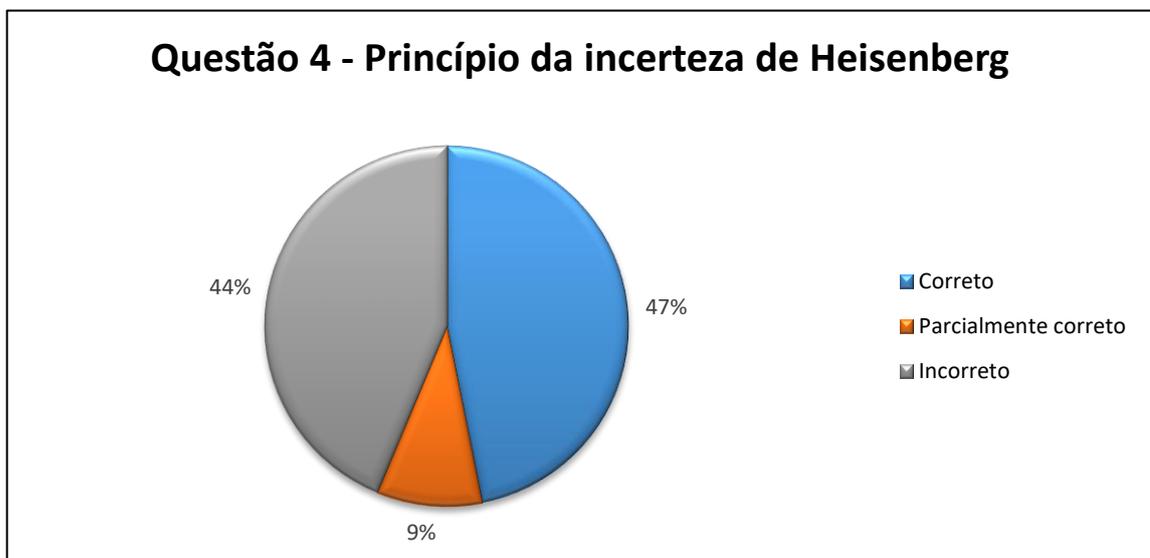


Gráfico 6.9: distribuição das respostas da Questão 4 do Teste Final. FONTE: o autor.

A Questão 6, por sua vez, tratava sobre o experimento mental do gato de Schrödinger. Segundo ela, uma das constatações do experimento era de que o gato poderia estar, ao mesmo tempo, vivo e morto. Foi, então, solicitado que os alunos descrevessem como isso era possível, baseados nos princípios fundamentais da Mecânica Quântica estudados. Salientou-se que a interpretação era baseada na Escola de Copenhague. Assim, considerou-se corretas as respostas que mencionaram, de alguma maneira, o princípio da superposição de estados, que é o que explica a condição simultânea (vivo e morto) do gato. Aos alunos que tentaram descrever o experimento de maneira correta, mas sem mencionar o princípio da superposição de estados, foi concedido meio escore. Os alunos que não se enquadraram em nenhuma das situações anteriores não pontuaram nessa questão. O Gráfico 6.10 traz os resultados obtidos pelos alunos, onde observa-se percentuais semelhantes de alunos que responderam correta e incorretamente o item. Todavia, o que mais se destaca é o percentual de alunos que respondeu à questão de maneira parcialmente correta, ou seja, soube de algum modo descrever o experimento, mas não destacou que a situação só era possível devido à superposição de estados.

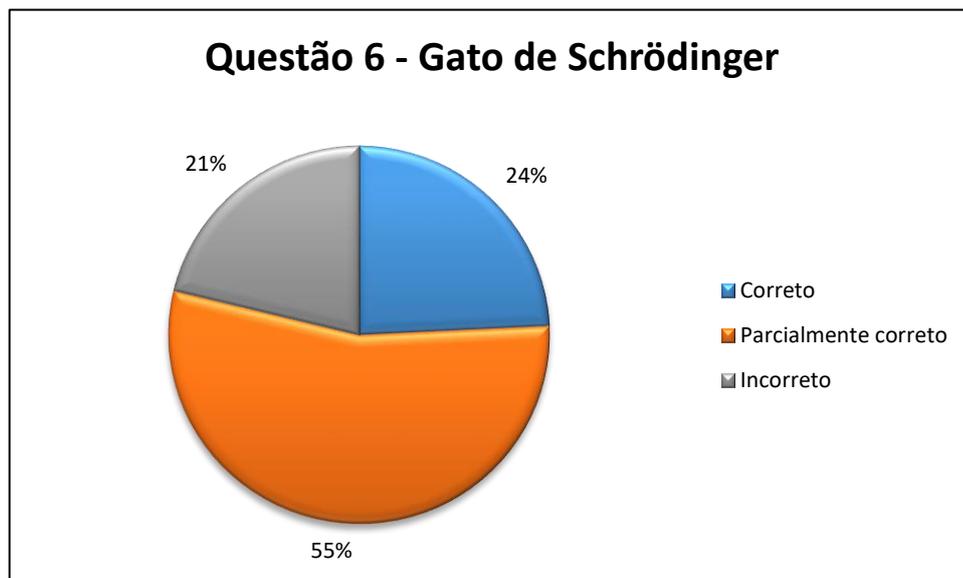


Gráfico 6.10: distribuição das respostas da Questão 6 do Teste Final. FONTE: o autor.

O diagnóstico que se faz a respeito das respostas às questões discursivas é que, aparentemente, nossos estudantes ainda têm imensa dificuldade em se expressar de maneira escrita, problema este que, numa primeira análise, ultrapassa as competências da Física. O que se pode arguir aqui é que há indícios de aprendizagem significativa em parcela significativa dos alunos, tendo em vista que algumas respostas foram apresentadas de maneira bastante formal e estruturada (MOREIRA, 2014). Em outros, verifica-se que até houve a intenção de responder corretamente, mas faltaram argumentos suficientes para tal. E uma outra parte deles

simplesmente não conseguiu expressar em palavras aquilo que, imaginava-se, fora apreendido em sala de aula. Ainda assim, pode-se considerar que os resultados alcançados foram satisfatórios, se for levado em consideração que o projeto era uma atividade voluntária, executada em período não curricular, de acordo com a contextualização apresentada no Capítulo 4.

A seguir, será procedida a discussão das questões que não compunham o grau final dos alunos, mas que serviram de subsídio a outros aspectos desta pesquisa, principalmente as questões 8 e 9, que constavam também do Teste Inicial.

Na Questão 7, procurou-se fazer um levantamento dos assuntos que os alunos consideraram mais atrativos. Por ser uma questão de natureza aberta, os mesmos puderam elencar todos os assuntos que mais lhes causaram surpresa, conforme pode-se observar no Gráfico 6.11.

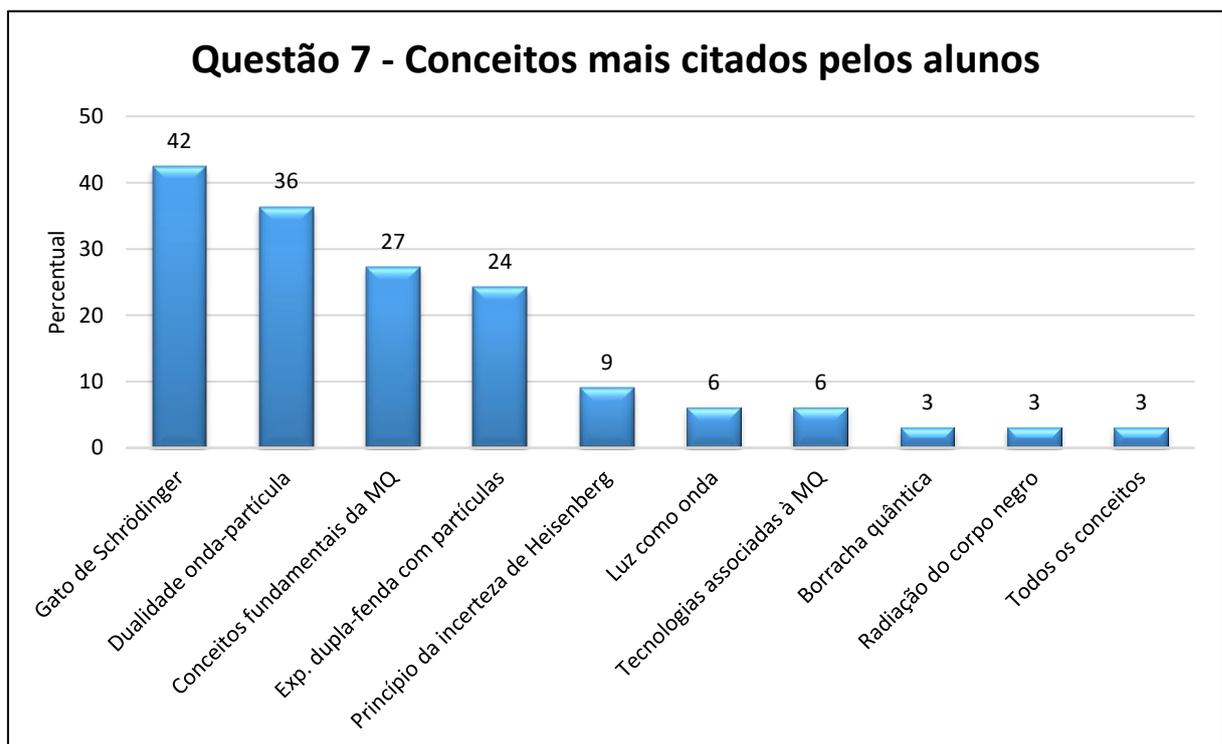


Gráfico 6.11: distribuição das respostas da Questão 7 do Teste Final. FONTE: o autor.

Apesar de constar no título deste trabalho, o experimento da borracha quântica foi citado por um único aluno. Dois motivos aparentes podem explicar tal desapontamento: a borracha quântica não era mencionada no título do projeto (Oficina sobre os princípios da Mecânica Quântica), e o próprio experimento, devido aos fatores limitadores discutidos no Capítulo 5, e frente às diversas simulações computacionais apresentadas, não pareceu tão atrativo aos olhos dos estudantes. Todavia, talvez o experimento da borracha quântica chame mais a atenção de

quem já possua os subsunçores relacionados à Mecânica Quântica (físicos em geral) do que aqueles que ainda não os possuem (ou estão adquirindo os mesmos), uma vez que se apresenta como nova alternativa à discussão dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica. Ou seja, para os físicos em geral, a borracha quântica é *a novidade*, enquanto que para os alunos *tudo é novidade*. Já o experimento de dupla-fenda com partículas, apresentado via simulação computacional e também analogamente, numa versão simplificada da borracha quântica (Figura 5.2), foi citado espontaneamente por 24% dos alunos. Mas o principal conceito citado foi o experimento mental do gato de Schrödinger, seguido de perto pela dualidade onda-partícula, com respectivamente 42% e 36% de alunos citando-os. Justifica-se esse alto percentual de citações pelo fato de que, quando apresentados, esses conceitos geraram grandes e acalorados debates, tamanha era a participação dos estudantes, e por serem anti-intuitivos. Os princípios fundamentais da Mecânica Quântica, como um todo, foram citados por 27% dos estudantes. Destes, a grande maioria mencionou particularmente o princípio da superposição de estados, tido sem dúvida como o mais atraente. Também foram citados o princípio da incerteza de Heisenberg, as tecnologias associadas à Mecânica Quântica e a radiação do corpo negro. Estranhamente, a luz como uma onda foi citada por dois alunos, ambos do 3º Ano. Esses, provavelmente, seguiram à risca a opção C da Questão 4 do Teste Inicial, ou seja, “escreveria sobre o primeiro raciocínio que tive, sem pensar muito”, uma vez que esses conhecimentos já deveriam estar mais enraizados em sua estrutura cognitiva desde o 2º Ano.

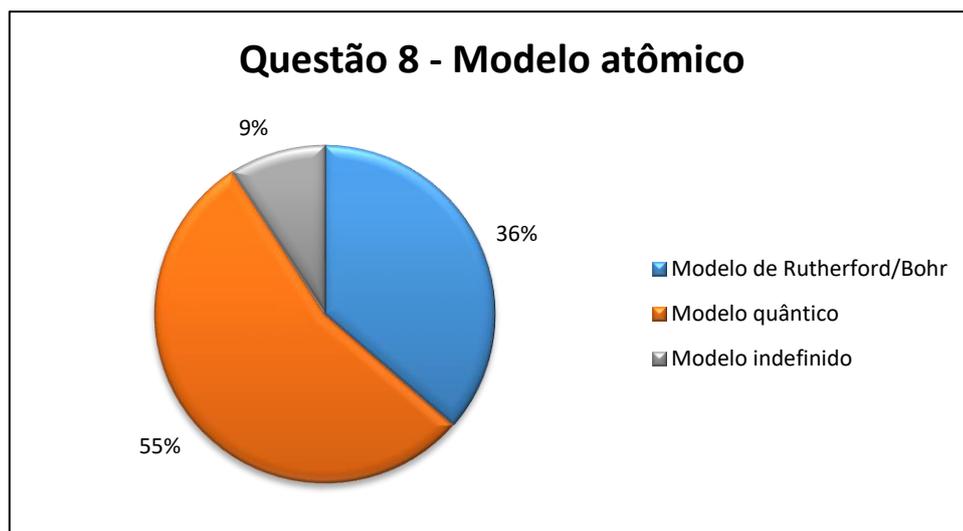


Gráfico 6.12: distribuição das respostas da Questão 8 do Teste Final. FONTE: o autor.

Como mencionado anteriormente, a Questão 8 do Teste Final era semelhante à Questão 5 do Teste Inicial. A intenção foi tentar comparar as concepções dos estudantes sobre o modelo atômico em momentos anteriores e posteriores à aplicação do projeto. O Gráfico 6.12 mostra a

distribuição das respostas à questão, cuja metodologia de correção foi a mesma adotada no Teste Inicial. Curiosamente, não foi possível associar o esboço de três alunos a nenhum dos modelos atômicos trabalhados, o que denota uma tendência parecida com a que foi discutida no fecho do parágrafo anterior.

Analisando o Gráfico 6.12, pode-se verificar que a maioria dos alunos apresentou esboços que traziam argumentos quânticos, seja através do próprio esboço, principalmente com a ideia de “nuvem de elétrons”, como esquematizado por boa parcela deles, ou então por meio de legendas, assim como feito no Teste Inicial. Todavia, mais de um terço dos alunos ainda apresentou uma concepção clássica a respeito do átomo. Para fins de comparação, montou-se o Gráfico 6.13, que traz os percentuais de cada modelo atômico classificado em cada um dos testes.

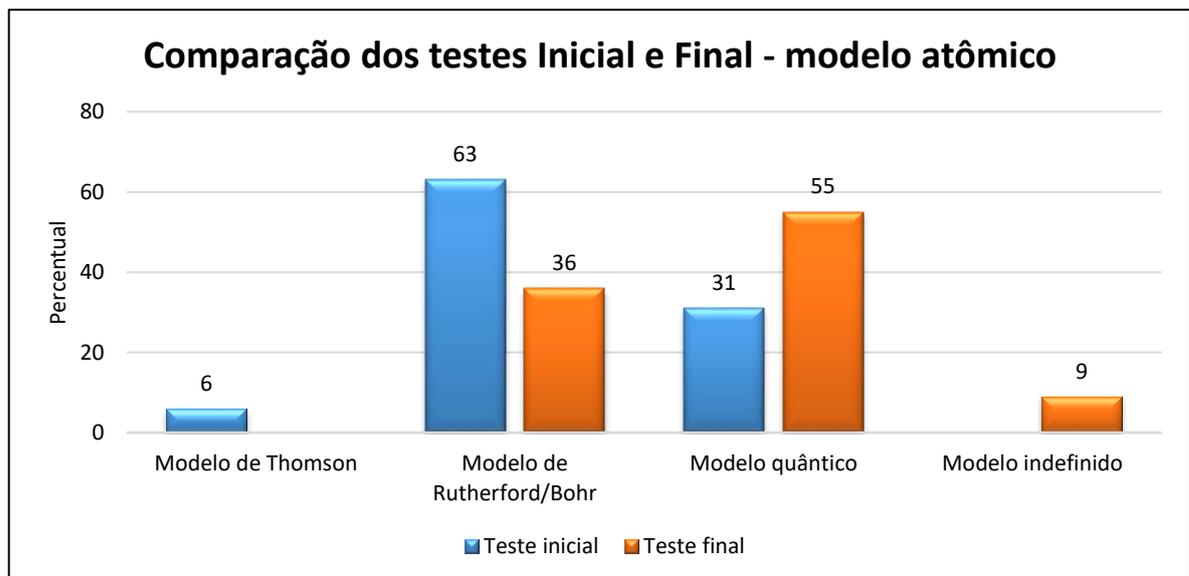


Gráfico 6.13: comparação das respostas sobre os modelos atômicos dos testes inicial e final. FONTE: o autor.

Alguns aspectos ficam bastante aparentes no Gráfico 6.13. O primeiro deles é que o modelo de Thomson, citado no Teste Inicial, não recebeu nenhuma menção no Teste Final, o que pode ser entendido como um abandono do modelo, ao menos no universo pesquisado. O segundo aspecto é que houve praticamente uma inversão entre os índices de alunos que esboçaram modelos atômicos clássicos e quânticos do Teste Inicial para o Teste Final. O percentual de alunos que adotou o modelo quântico quase dobrou, enquanto o percentual dos que seguiam o modelo de Rutherford praticamente caiu pela metade. Mas talvez o principal ponto dessa análise é que, mesmo após toda a discussão realizada sobre a teoria quântica e suas implicações, ainda se verificou que pouco mais de um em cada três alunos ainda assumiu um modelo clássico para a descrição do átomo. A explicação para tal constatação pode ter dois

focos. No primeiro, pode-se interpretar que os alunos não conseguiram combinar as ideias adquiridas durante o projeto com aquelas já estabelecidas em sua estrutura cognitiva, no que Ausubel chamou de reconciliação integrativa (MOREIRA, 2014). Numa segunda hipótese, deve-se levar em consideração que a mudança conceitual (MORTIMER, 2000; MOREIRA e GRECA, 2003) pode não ter ocorrido, uma vez que uma ideia já estabelecida, como o modelo de Rutherford e sua semelhança com o modelo que descreve as órbitas planetárias, constitui um conceito que foi, aparentemente, assimilado de modo significativo. Dessa forma, segundo Moreira e Greca (2003),

[...] a aprendizagem significativa não é apagável; significados internalizados significativamente (isto é, incorporados à estrutura cognitiva de modo não-arbitrário e não-literal) ficam para sempre na estrutura cognitiva do aprendiz, como possíveis significados de um subsunçor mais elaborado, rico, diferenciado. É como se cada indivíduo tivesse sua história cognitiva pessoal e não-apagável (p.306).

Como mencionado neste capítulo, ao término da análise do Teste Inicial, solicitou-se que os alunos representassem os conceitos da Mecânica Quântica que eram de seu conhecimento, e estabelecessem uma relação gráfica entre eles, a fim de comparar essas ideias com o novo quadro que surgiu no Teste Final. Se na primeira verificação por volta de 50% dos alunos estabeleceu a relação solicitada, no Teste Final esse índice subiu para 85%, o que demonstra, no mínimo, um considerável aumento acerca da percepção dos alunos sobre a Mecânica Quântica. Como seria impraticável (e fora do contexto deste trabalho) analisar e comparar os mapas de todos os alunos, optou-se por escolher, aleatoriamente, um aluno de cada ano de ensino, e proceder um pequeno exame dos resultados expressados por eles. Logicamente, esse quantitativo não representa, estatisticamente, o universo de cada ano, uma vez que se tinha uma distribuição não equitativa de alunos dentro dos anos de ensino, como se verifica na Tabela 4.1. Também não se esperava constatar um nível de conhecimento crescente conforme se avance na análise de cada ano, uma vez que a realidade e a percepção de cada aluno são muito particulares. A expectativa, sim, era de que houvesse uma perceptível diferença entre os testes Inicial e Final, para que se pudesse analisar se as discussões ocorridas na sala de aula serviram para engrandecer o conhecimento dos alunos a respeito da Mecânica Quântica.

Quanto à análise que será procedida, que, por si só, poderia ser tema de uma dissertação ou tese, pretende-se verificar apenas dois aspectos: se ocorreu uma maior generalização dos conceitos sobre a Mecânica Quântica mencionados no Teste Final, em comparação ao Teste Inicial, e se o aluno conseguiu relacionar esses conceitos de maneira coerente com o que foi

apresentado em sala de aula. E, baseado nesses aspectos, inferir, ainda que minimamente, se houve indícios de aprendizagem significativa.

O primeiro aluno analisado pertencia ao 9º Ano do Ensino Fundamental. Por lidar com ele e conhecê-lo relativamente bem, pode-se afirmar que é um aluno extremamente esforçado e estudioso, era o destaque de seu ano, e participava de várias atividades paralelas do Colégio, entre elas o Clube de Astronomia. Talvez aí se explique a quantidade de termos físicos utilizados em seu diagrama do Teste Inicial que, a princípio, não teriam vindo das aulas curriculares normais de seu ano de ensino. A Figura 6.3 mostra os dois diagramas confeccionados pelo aluno, sendo o mais acima o pertencente ao Teste Inicial, e o mais abaixo, o do Teste Final.

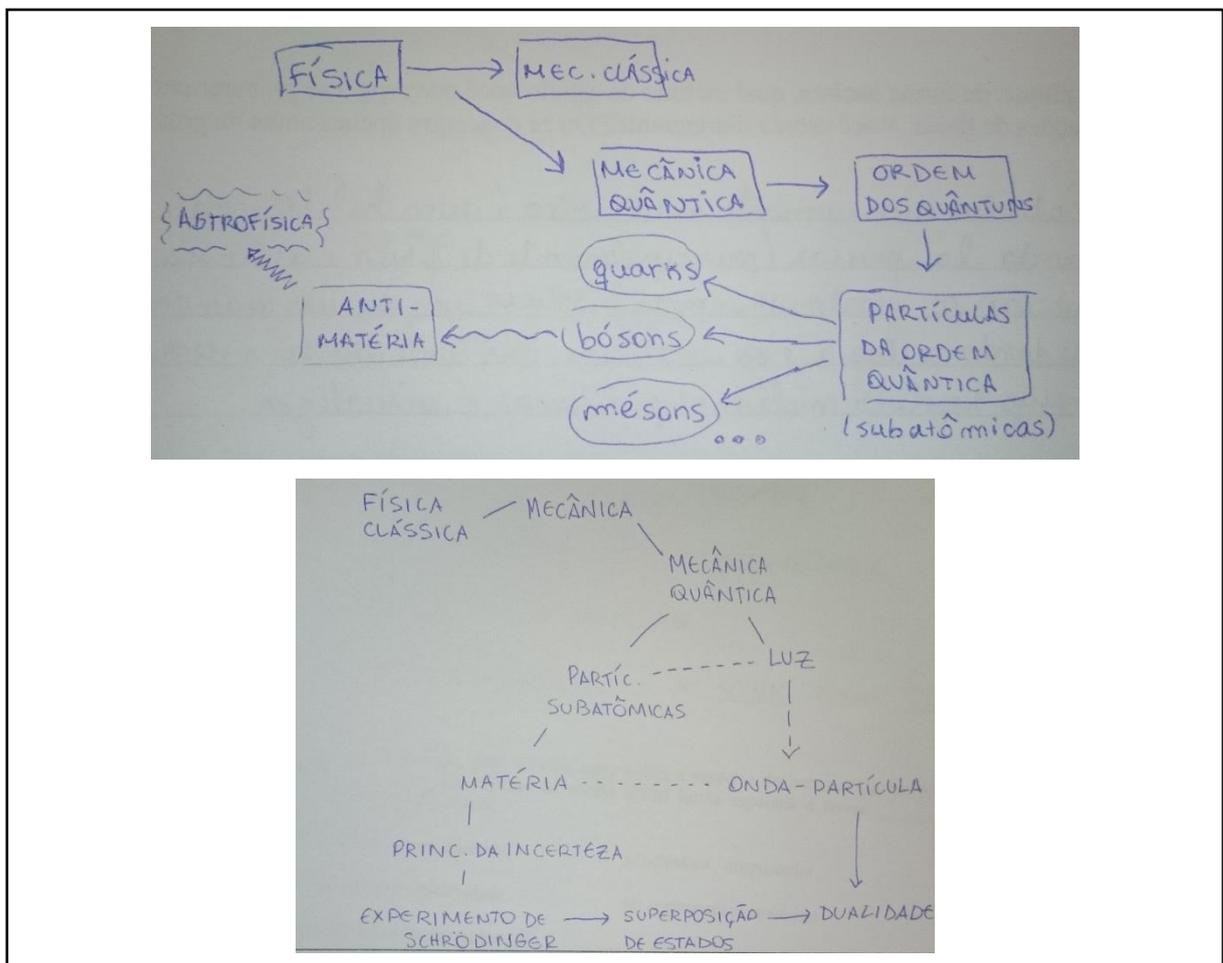


Figura 6.3: diagramas dos testes inicial e final produzidos por um aluno do 9º Ano. FONTE: o autor.

Percebe-se que, no Teste Inicial, o aluno utilizou termos relacionados principalmente à física de partículas, que ao fim de seu esboço se ligavam à Astrofísica, o que demonstra forte influência dos conhecimentos adquiridos no Clube de Astronomia. Inicialmente, ele diferenciou

corretamente a Mecânica Clássica da Quântica, diferentemente do que representou no Teste Final. Aqui, por sinal, constaram diversos termos tratados durante o projeto. Entre eles, destacam-se o princípio da incerteza, a dualidade onda partícula e os princípios fundamentais da Mecânica Quântica, todos relacionados de forma lógica. Neste caso, baseado nos pressupostos de Ausubel (MOREIRA, 2014), pode-se afirmar que houve indícios de aprendizagem significativa, uma vez que o aluno já trazia consigo uma bagagem intelectual, ou seja, subsunçores que o auxiliaram no enriquecimento e na construção de novos subsunçores do assunto. Além disso, o mesmo era voluntário no projeto e participante do Clube de Astronomia, o que denota sua vontade de aprender. E, aparentemente, os conhecimentos adquiridos, pelos fatos aqui apresentados, foram incorporados à sua estrutura cognitiva de modo não arbitrário e não literal. Assim, para o aluno do 9º Ano analisado, os conhecimentos sobre a Mecânica Quântica compartilhados no decorrer do projeto podem, numa primeira avaliação, ser considerados potencialmente significativos.

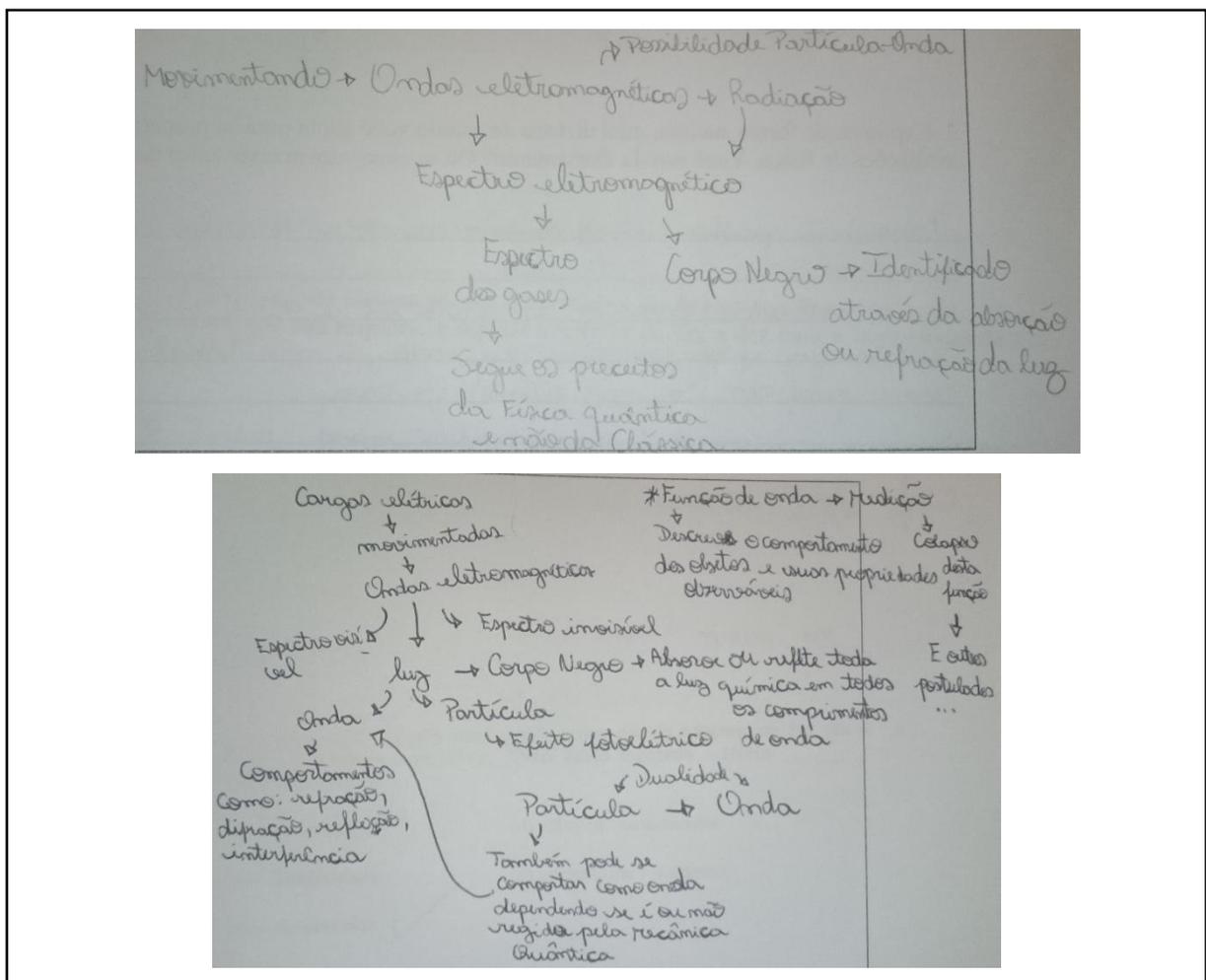


Figura 6.4: diagramas dos testes inicial e final produzidos por um aluno do 1º Ano. FONTE: o autor.

O segundo aluno avaliado, por sua vez, pertencia ao 1º Ano do Ensino Médio, sendo também um dos destaques de seu ano. Pode-se perceber no seu esboço do Teste Inicial (imagem superior da Figura 6.4) que alguns termos tratados durante o projeto já faziam parte do seu arcabouço intelectual, como o conceito de corpo negro, o espectro de emissão dos gases, e a “possibilidade partícula-onda” relatada, muito provavelmente em alusão à dualidade onda-partícula. Chama a atenção o fato de que o aluno citou a palavra “movimentando”, também possivelmente se referindo às cargas elétricas, que quando colocadas em movimento geram ondas eletromagnéticas.

A imagem inferior da Figura 6.4 traz o esboço do Teste Final. Inegavelmente, ela apresenta uma gama de conceitos maior e mais detalhada do que o esboço do Teste Inicial. Os conceitos referentes à radiação do corpo negro e da dualidade onda-partícula sofreram modificações, tanto no que se refere ao conteúdo quanto à sua significação para o aluno. Segundo Ausubel (MOREIRA, 2014), esse processo de aprendizagem é dito subordinado, uma vez que as novas informações se atrelam a outras já existentes, e a modificação desses conceitos é por ele chamada de diferenciação progressiva, já que os conceitos preexistentes na estrutura cognitiva do aluno sofreram transformações, tornando-se mais complexos, como bem mostra o esboço, ao passo que novos conceitos ganharam significado. Além disso nota-se, dentre outros, que os princípios fundamentais da Mecânica Quântica constaram do diagrama elaborado pelo aluno, valendo assim, para ele também, as mesmas conclusões alcançadas a respeito da aprendizagem do aluno do 9º Ano.

O aluno analisado do 2º Ano era o único representante de sua classe. Assim como os demais, também era um dos destaques de seu ano, sendo participante de outras atividades extraclasse, entre elas o Clube de Química. Em seu esboço apresentado no Teste Inicial, visto na imagem superior da Figura 6.5, não constaram termos como os vistos anteriormente, a não ser uma menção ao “salto quântico”, ao lado de uma representação de como ele imaginava o fenômeno. Supõe-se que o termo possa ter origem em aulas do Clube de Química, que trataram de temas afins.

Já o esboço do Teste Final (imagem inferior da Figura 6.5) traz as concepções do aluno a respeito dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, provavelmente o tema que se mostrou mais significativo para ele. No esboço percebe-se a presença de todos os princípios estudados, com uma breve definição de cada um, além das setas indicando sua linha de raciocínio. O tema escolhido, apesar de ter sido comentado em 3 dos 6 encontros, era completamente novo para os alunos, uma vez que não consta dos currículos do Ensino Médio.

Mesmo assim, imagina-se que aluno decidiu citá-lo por depositar confiança em si e naquilo que aprendeu. De acordo com Ausubel (MOREIRA, 2014), quando o estudante relaciona ideias estabelecidas em seu arcabouço intelectual, e as combina com outras que vem a adquirir, os elementos presentes em sua estrutura cognitiva se reorganizam e passam a ter novos significados, no que Ausubel chamou de reconciliação integrativa. Assim, aparentemente o aluno incorporou o tema escolhido à sua estrutura cognitiva, uma vez que pode conectá-lo a uma ideia mais ampla da Física que já possuía.

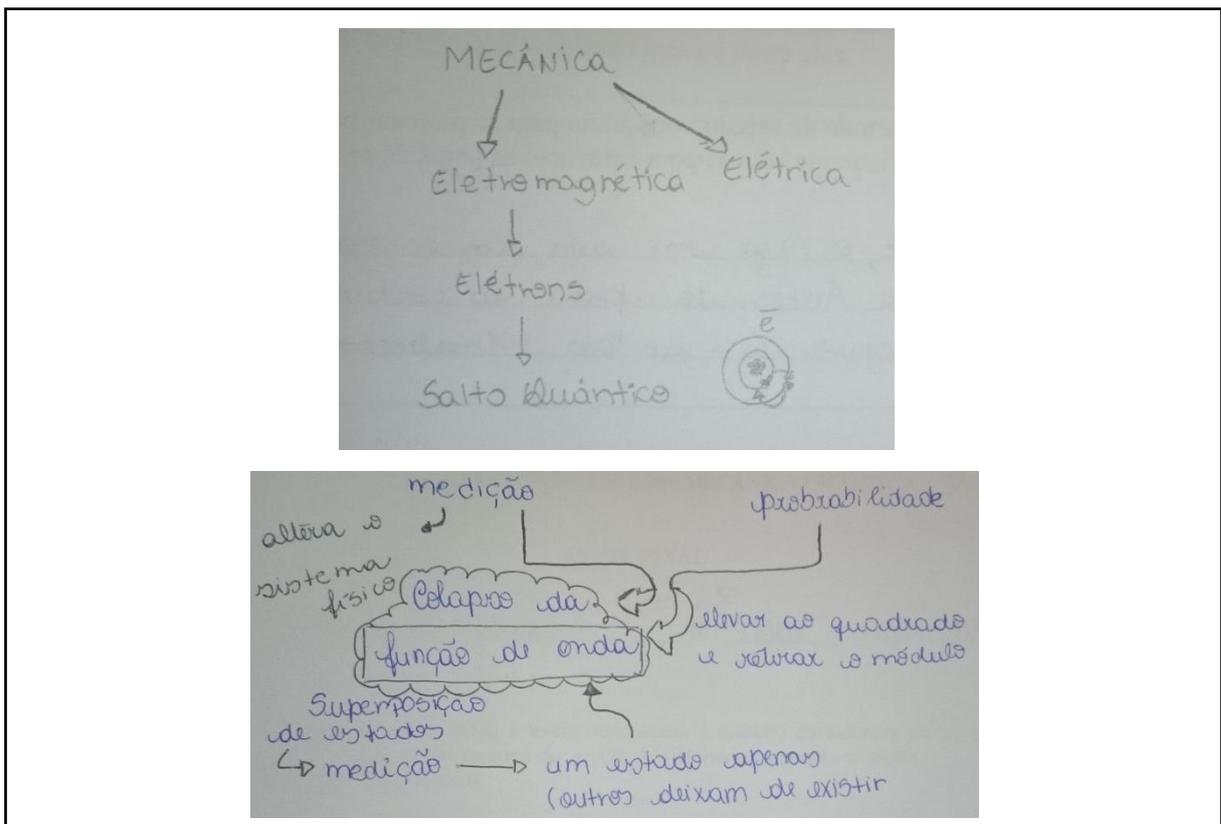


Figura 6.5: diagramas dos testes inicial e final produzidos por um aluno do 2º Ano. FONTE: o autor.

O último aluno analisado foi um representante do 3º Ano. Esse aluno, diferente dos demais, não se destacava em sua classe, o que não significa que não era um bom estudante. Em seu esboço inicial (imagem superior da Figura 6.6), percebe-se que o mesmo indicou a Mecânica Quântica como uma ramificação da Física, e desta surgiam os “quantuns” (ao invés de quanta), além de outras citações não quânticas. Já no esboço do Teste Final, que pode ser visto na imagem inferior da Figura 6.6, o aluno distinguiu as duas teorias a respeito da natureza da luz estudadas, dando ênfase à teoria ondulatória. Apesar de cometer alguns equívocos quanto à montagem do seu esboço, o aluno citou alguns dos temas abordados, como a dualidade onda-partícula, o efeito fotoelétrico, e talvez uma menção ao princípio da incerteza.

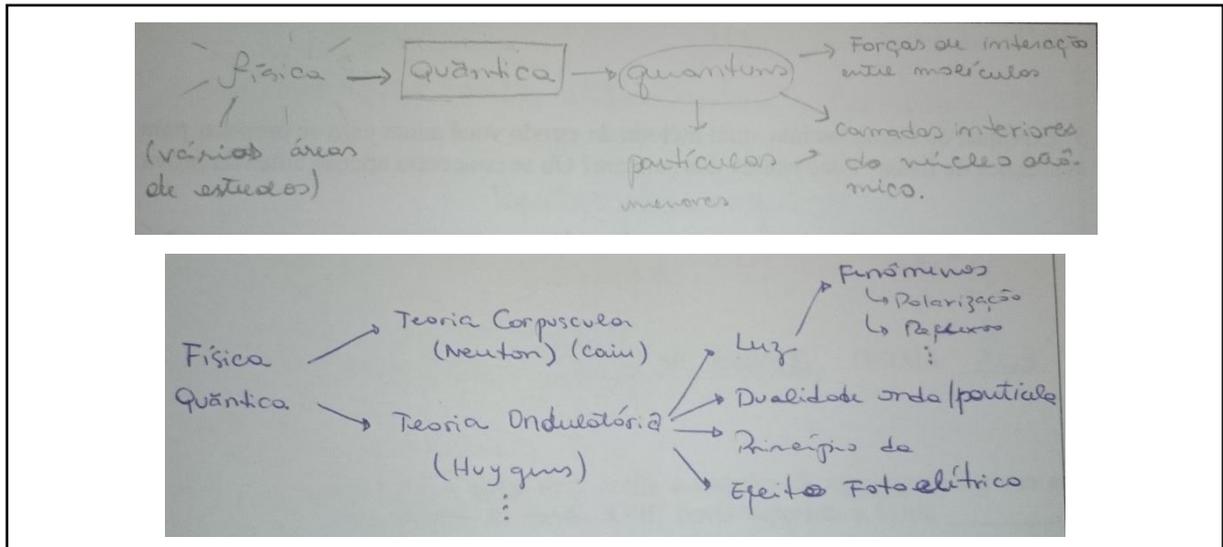


Figura 6.6: diagramas dos testes inicial e final produzidos por um aluno do 3º Ano. FONTE: o autor.

Era de se esperar, talvez, que o aluno do 3º Ano apresentasse um esboço mais completo, quando comparado aos demais colegas analisados. No entanto, como comentado no Capítulo 4, o 3º Ano do Colégio Militar possuiu várias características peculiares que podem ter influenciado a participação do aluno no projeto. Apesar de um único aluno não poder representar estatisticamente um universo de quase 30 estudantes, o que se percebeu, numa análise sumária desse universo, foi uma tendência de esboços mais pobres de conceitos quando comparados aos três alunos analisados anteriormente. Ainda assim, de uma maneira geral, houve a citação de pelo menos um termo estudado por cada aluno do 3º Ano que respondeu à questão.

Finalizando a análise do Teste Final, a última pergunta objetivava obter a opinião dos estudantes a respeito da utilidade do projeto dentro da sua formação no Ensino Médio (apesar de nem todos os alunos pertencerem a esse universo). Como era uma pergunta aberta, houve diversas opiniões. De um modo geral, a grande maioria das respostas classificaram o projeto como positivo ou muito positivo. Os alunos atribuíram um valor para a importância do estudo, que teve notas variando de 6 a 10. Na média, o valor atribuído pela turma ficou em torno de 9. Dentre as críticas, houve opiniões com ideias opostas. Enquanto alguns alunos afirmaram que o tema deveria ser ensinado no Ensino Médio, outros alegaram que o projeto não foi útil justamente por não estar previsto nos currículos. Um aluno criticou o horário conturbado, uma vez que alguns encontros coincidiram com as aulas de recuperação da disciplina regular. Alguns alunos ainda sugeriram que o projeto deveria ser mais extenso, para que uma gama maior de assuntos da área fosse abordada.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem por finalidade elencar as principais conclusões e os ensinamentos que foram colhidos no decorrer do projeto.

No que diz respeito à FMC, mais especificamente à Mecânica Quântica, parece não haver mais dúvidas quanto à importância do tema dentro dos currículos de Física do Ensino Médio. Um pequeno exemplo disso foi o interesse demonstrado pelos alunos durante o projeto, cujos fatos estão registrados no capítulo anterior. Por ser o assunto alvo de diversos estudos, a articulação de tópicos de FMC no contexto escolar é defendida por vários autores, além de estar prevista na legislação que regula o funcionamento do ensino no Brasil. Assim, iniciativas como este trabalho vão ao encontro dessa demanda, na tentativa de proporcionar uma ferramenta que seja atraente aos olhos dos alunos, e sirva de auxílio ao professor de Física do Ensino Médio. Entende-se que é obrigação de todo professor de Física tornar sua aula mais atrativa, sob pena de se perder cada vez mais espaço dentro do ensino, e também perder o interesse dos próprios alunos.

Quanto à forma de abordagem desses assuntos, verifica-se a necessidade de realizar um bom processo de transposição didática, para que se atinjam os pressupostos estabelecidos por Chevallard (1991). Devido às características de cada esfera do saber, precisa-se criar um caráter didático naquilo que se está tentando ensinar, a fim de adequar os conteúdos oferecidos ao nível de conhecimento e habilidades dos estudantes.

Particularmente no que se refere aos conteúdos tratados no projeto, sob a perspectiva das características propostas por Chevallard (1991) para que a transposição didática ocorra, pode-se afirmar que a Mecânica Quântica é consensual, uma vez que, atualmente, quase a totalidade da comunidade científica comunga da funcionalidade do modelo adotado há praticamente um século. Ela também possui atualidade moral, pois o sistema de ensino lhe atribui elevado valor, mesmo que isso ainda se reflita nos currículos escolares de maneira tímida, diferentemente do que se esperaria. Além da importância que a sociedade lhe atribui, também possui grande valor entre os físicos, visto que esta característica se interliga fortemente

com a consensualidade, ou seja, a importância consignada à Mecânica Quântica pela comunidade científica. Já quanto à operacionalidade, verificou-se que os exercícios devem possuir um caráter mais qualitativo do que quantitativo, ou seja, deve-se dar maior ênfase à parte conceitual, em detrimento ao formalismo matemático, ao menos nas condições em que o projeto foi aplicado. Pelos motivos já expostos anteriormente, e pelo pequeno tempo disponível frente à amplitude de conceitos, deve-se focar naquilo que realmente possa fazer sentido para os estudantes (por exemplo, mostrou-se bastante produtiva a discussão ocorrida com a exposição do experimento mental do gato de Schrödinger, fato que se destacou quando da apresentação do capítulo anterior).

Outra característica descrita por Chevallard (1991), a criatividade didática, que é a capacidade de um conceito se inserir no ambiente escolar, ainda não é verificada de maneira consistente. Entende-se que tal fato ocorre porque a Mecânica Quântica ainda não conseguiu criar uma identidade própria no Ensino Médio, o que pode ser explicado por uma série de fatores. Entre eles, a pequena presença do tema nos currículos escolares, poucas menções nos livros didáticos, e até mesmo a falta de intimidade dos professores com o assunto, uma vez que não se tem no Brasil a cultura da formação continuada. Além disso, raros são os exames de admissão ao Ensino Superior que tratam do tema. O principal deles, o ENEM, por exemplo, não aborda conceitos de FMC. Por fim, verificou-se que, no âmbito do projeto, os temas tratados são terapêuticos, uma vez que os conceitos da Mecânica Quântica apresentados sofreram um processo de transposição didática e foram aceitos, embora a nível não aprofundado, pela grande maioria dos alunos. Entretanto, quando o cenário analisado é o Ensino Médio, tal constatação não se mostra verdadeira.

Sob o ponto de vista do referencial teórico da aprendizagem significativa de Ausubel, a pesquisa mostrou-se inconclusiva sobre os hábitos de estudo que o universo pesquisado adota. Ora parte deles apresentava um comportamento cuja tendência era de uma aprendizagem mecânica, ora demonstravam que seus hábitos pendiam a uma aprendizagem significativa. Não houve a predominância de um tipo de aprendizagem em detrimento da outra. O pequeno universo analisado na pesquisa influenciou diretamente esse resultado.

A maioria dos estudantes conseguiu diferenciar fenômenos ondulatórios de corpusculares, com exceção daqueles fenômenos que ainda não tinham sido apresentados a eles. A verificação realizada por ocasião da aplicação do Teste Final mostrou um bom aproveitamento por parte dos alunos nas questões que não exigiam respostas discursivas. Nelas, não é possível inferir comentários a respeito da existência de indícios de aprendizagem

significativa, uma vez que as questões não geraram subsídios que corroboram tal afirmação. Já as questões discursivas indicaram uma baixa capacidade de expressão escrita dos alunos, mas ainda assim estes conseguiram um percentual de acerto aceitável. A análise das questões verificou indícios de aprendizagem significativa em boa parcela dos alunos, que conseguiram de alguma forma justificar suas respostas com base nos conhecimentos adquiridos no decorrer do projeto.

Já as questões que tentaram comparar o conhecimento anterior dos alunos com aquele adquirido durante o projeto mostraram-se muito úteis, pois forneceram valiosos elementos para a análise de como se deu a modificação dos conceitos tratados. Observou-se, no Teste Final, uma inversão dos percentuais de alunos que adotavam os modelos atômicos de Rutherford/Bohr e quântico, quando comparado ao Teste Inicial. Além disso, de uma maneira geral, além dos 4 alunos analisados de forma individual, percebeu-se um aumento expressivo de termos quânticos, tratados durante o projeto, na análise do Teste Final. Assim, pode-se afirmar que houve indícios de aprendizagem significativa, já que os alunos conseguiram demonstrar conhecimento e segurança nas respostas que apresentaram. A maioria delas era compatível com as ideias discutidas em sala de aula.

Analisando os resultados apresentados pelos alunos de forma geral, pode-se inferir que houve bons indícios de aprendizagem significativa. Como aquele universo de estudantes encontrava-se ali de forma voluntária, imagina-se, também, que grande parte deles tinha a disposição de aprender aquilo que se pretendia ensinar (MOREIRA, 2014). Como essas duas condições, impostas por Ausubel, aparentemente foram satisfeitas, acredita-se, então, que os temas aqui estudados, materializados no Produto Educacional (Apêndice G) resultante deste trabalho, em particular os princípios fundamentais da Mecânica Quântica, podem ser considerados potencialmente significativos.

A experiência de ensinar através de analogias mostrou-se extremamente valorosa em todos os momentos do projeto, mesmo que tal metodologia seja condenada por alguns autores (BUNGE, 2000). Sempre que possível, buscou-se um análogo clássico para tratar de um assunto quântico, principalmente nas tentativas de descrever a luz. De todas as analogias utilizadas, a que mais surtiu efeito foi o experimento mental do gato de Schrödinger, muito provavelmente pela situação inusitada a que os alunos foram submetidos quando desafiados a expor os princípios fundamentais da Mecânica Quântica contidos na analogia.

Por fim, convém ressaltar novamente o papel fundamental que as simulações computacionais desempenharam no decorrer dos encontros. A importância de tais ferramentas

foi comprovada a cada aula, podendo-se afirmar que foram essenciais para que os alunos alcançassem os resultados obtidos. Não menos importante foram os experimentos reais empregados, sobretudo aquele que deu título a este projeto: a borracha quântica. Apesar de não ficar claro aos alunos sua importância no processo de ensino-aprendizagem, talvez porque ofuscada pela beleza e clareza dos experimentos virtuais, a borracha quântica permitiu a verificação de todos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica aqui estudados, coroando a intenção deste projeto, e demarcando de vez a fronteira entre as Físicas Clássica e Quântica.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARONS, A. B. *A guide to introductory physics teaching*. New York: John Wiley, 1990.

AUSUBEL, D. P. *Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva*. 1. ed. Lisboa: Paralelo Editora, 2003.

BRASIL. *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*. Brasília, MEC/SEB, 1996.

BRASIL. Ministério da Educação. *Base Nacional Comum Curricular 2016, segunda versão revisada*. Disponível em: <<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/documentos/BNCC-APRESENTACAO.pdf>>. Acesso em: 16 março 2017.

BRASIL. Ministério da Educação. *Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais da Educação Básica*. Brasília, MEC/SEB, 2013.

BRASIL. Ministério da Educação. *Guia de Livros Didáticos PNLD 2012 – Física*. Brasília, MEC/SEB, 2011.

BRASIL. Ministério da Educação. *Guia de Livros Didáticos PNLD 2015 – Física*. Brasília, MEC/SEB, 2014.

BRASIL. Ministério da Educação. *Orientações Curriculares para o Ensino Médio*. Brasília, MEC/SEB, 2006.

BRASIL. Ministério da Educação. *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais*. Brasília, MEC/SEB, 2002.

BRASIL. Ministério da Educação. *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio*. Brasília, MEC/SEB, 1999.

BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de física moderna? *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 387-404, dez. 2005.

BUNGE, M. *Física e filosofia*. São Paulo: Editora Perspectiva, 2000.

CARDOSO, S. O. O.; DICKMAN, A. G. Simulação computacional aliada à Teoria da Aprendizagem Significativa: uma ferramenta para o ensino a aprendizagem do efeito fotoelétrico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 29, n. Especial 2, p. 891-934, out. 2012.

CHEVALLARD, Y. *La transposición didáctica: del saber sabio al saber enseñado*. La Pensée Sauvage, Argentina, 1991.

FISCHLER, H.; LICHTFELDT, M. Modern physics and student's conceptions. *International Journal of Science Education*, London, v. 14, n. 2, p. 181-190, Apr./June 1992.

GIL, D. P.; SENENT, F.; SOLBES, J. Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, Rosario, v. 2, n. 1, p. 16-21, abr. 1988.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 444-457, dez. 2001.

HILLMER, R.; KWIAT, P. A do-it-yourself quantum eraser. *Scientific American*, New York, v. 296, n. 5, p. 72-77, May 2007.

JORGE, W. Analogia no ensino da física. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 7, n. 3, p. 196-202, dez. 1990.

JUNIOR, J. H. F.; LUNAZZI, J. J. *Construção de uma borracha quântica*. Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2007/JorgeH-MonicaRF.pdf>. Acesso em: 15 junho 2015.

KUHN, T. A. *A estrutura das revoluções científicas*. 6ª ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 2001.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no Ensino de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 77-86, jun. 2002.

MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. 2ª ed. São Paulo: EPU, 2014.

MOREIRA, M. A.; GRECA, I. M. Mudança conceitual: análise crítica e propostas à luz da teoria da aprendizagem significativa. *Ciência e Educação*, Bauru, v. 9, n. 2, p. 301-315, 2003.

MOREIRA, M. A.; MASSONI, N. T. *Epistemologias do século XX*. São Paulo: EPU, 2011.

MORTIMER, E. F. Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos? *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 20-39, jan. 1996.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "física moderna e contemporânea no ensino médio". *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-48, jan. 2000.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Relatividade restrita no Ensino Médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, n. 1, p. 83-102, abr. 2004.

PEREIRA, A. P.; PESSOA JR., O.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 29, n. Especial 2, p. 831-863, out. 2012.

RICCI, T. F.; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-88, mar. 2007.

SAKURAI, J. J.; NAPOLITANO, J. *Mecânica Quântica moderna*. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SILVA, I.; JUNIOR, O. F. A descoberta do efeito Compton: de uma abordagem semiclássica a uma abordagem quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 1601, fev. 2014.

SLOVINSCKI, L. *A física moderna e contemporânea nas obras indicadas pelo programa nacional do livro didático: uma análise sob a perspectiva da transposição didática*. 2012. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

SOUZA, V. C. A.; JUSTI, R. S.; FERREIRA, P. V. M. Analogias utilizadas no ensino dos modelos atômicos de Thomson e Bohr: uma análise crítica sobre o que os alunos pensam a partir delas. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 7-28, mar. 2006.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola de 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

TERRAZZAN, E. A. *Perspectivas para a inserção de física moderna na escola média*. São Paulo: Curso de Pós-Graduação em Educação - USP, 1994. Tese.

ZAMBON, L. B.; TERRAZAN E. A. Analogias produzidas por alunos do ensino médio em aulas de física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 1505, mar. 2013.

9. APÊNDICES

Apêndice A – Guia da Aula 1

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

GUIA AULA 1

Discussões a respeito da natureza da luz

Teoria corpuscular:

Defensores: _____

Argumentos: _____

Teoria ondulatória:

Defensores: _____

Argumentos: _____

Corpo Negro

Definição: _____

Exemplos de corpos negros

Corpo	Temperatura (K)	Comprimento de onda (nm)	Faixa do espectro EM (pico)
Terra	300		
Forno	660		
Filamento lâmpada	3000		
Sol	5700		
Lava			
Gigante Vermelha			
Gigante Azul			
Anã Branca			
Anã Marrom			
N (líquido)			
He (líquido)			
He (sólido)			

Emissão e absorção de radiação pelos átomos

Explicação: _____

Links dos simuladores

Corpo negro https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/blackbody-spectrum

Emissão / Absorção https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/discharge-lamps

Apêndice B – Guia da Aula 2

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

GUIA AULA 2**Discussões a respeito da natureza da luz****Ondas:**

Definição e características: _____

_____**Propriedades:**

Reflexão: _____

Refração: _____

Difração: _____

Interferência: _____

Polarização: _____

O experimento de dupla-fenda de Young

Explicação: _____

Efeito Fotoelétrico

Problemas da explicação da Física Clássica: _____

Explicação da proposta por Einstein: _____

Elemento	Função trabalho (ϕ) (eV)	Frequência de corte (f_0) (Hz)	Comprimento de onda (nm)	Faixa do espectro EM
Sódio	2,28			
Zinco	4,3			
Cobre	4,7			
Platina	6,35			
Cálcio	2,9			
Magnésio	3,68			

Valores de constantes

Velocidade da luz no vácuo: $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$

Constante de Planck: $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$ ou $h = 4,135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$

Conversão Joule elétron-volt: $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

Produto $hc = 1240 \text{ eV nm}$

Links dos simuladores

Interferência de ondas https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-interference

Efeito fotoelétrico https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric

Apêndice C – Guia da Aula 3

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

GUIA AULA 3**Dualidade onda-partícula**

Conceito: _____

Efeito Compton

Conceito: _____

Equação: $p =$

Implicações: _____

Ondas de matéria

Conceito: _____

Equação: $\lambda =$

Implicações: _____

Experimento de dupla fenda

Fótons: _____

Partículas: _____

O princípio da incerteza

Conceito: _____

Interpretação matemática: _____

Implicações: _____

Links dos simuladores

Exp. Davisson-Germer https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/davisson-germer

Interferência quântica https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference

Modelos átomo H https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/hydrogen-atom

Apêndice D – Guia da Aula 4

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

GUIA AULA 4**Função de onda**

Conceito: _____

Estado

Conceito: _____

Probabilidade

Conceito: _____

Medição

Conceito: _____

O gato de Schrödinger

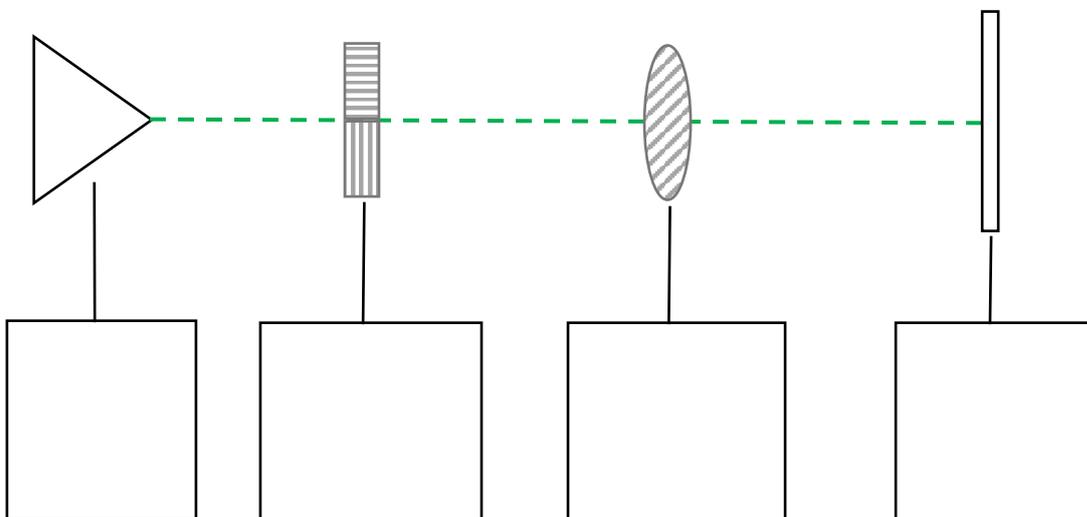
Conceito: _____

Experimento de dupla fenda com partículas

Conceito: _____

Experimento da borracha quântica

Identifique cada um dos componentes do experimento, e descreva sua função



Links dos simuladores

Interferência quântica

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference

Tunelamento quântico

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-tunneling

Apêndice E – Teste Inicial

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

NOME: _____ Nº: _____ TURMA: _____

O PRESENTE TESTE TEM POR FINALIDADE REUNIR SUBSÍDIOS PARA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO QUAL ESTA OFICINA FAZ PARTE. ASSIM, SOLICITA-SE AO ALUNO QUE RESPONDA APENAS AQUILO QUE SEJA DO SEU CONHECIMENTO, E USE DA MAIOR SINCERIDADE POSSÍVEL NAS RESPOSTAS DISCURSIVAS.

1. Abaixo estão listados alguns termos da Física que você já conhece, ou ouviu falar, em algum momento de sua vida. Assinale, nos parênteses, a letra “P” se você considera que o termo possui características de partícula, ou “O” se o termo apresenta alguma propriedade relacionada às ondas:

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> frequência | <input type="checkbox"/> ponto material |
| <input type="checkbox"/> efeito fotoelétrico | <input type="checkbox"/> interferência |
| <input type="checkbox"/> difração | <input type="checkbox"/> polarização |
| <input type="checkbox"/> colisão elástica | <input type="checkbox"/> energia cinética |
| <input type="checkbox"/> espectro eletromagnético | <input type="checkbox"/> experimento da dupla-fenda |
| <input type="checkbox"/> elétron | <input type="checkbox"/> fóton |

2. A fim de angariar fundos para obras sociais, um professor organizou uma rifa beneficente entre os alunos de uma turma. O aluno A adquiriu $2/13$ dos bilhetes; o aluno B, $1/7$; o aluno C, $3/25$; o aluno D, $5/33$; e o aluno E, $7/45$. Qual aluno tem mais chance de ganhar o prêmio?

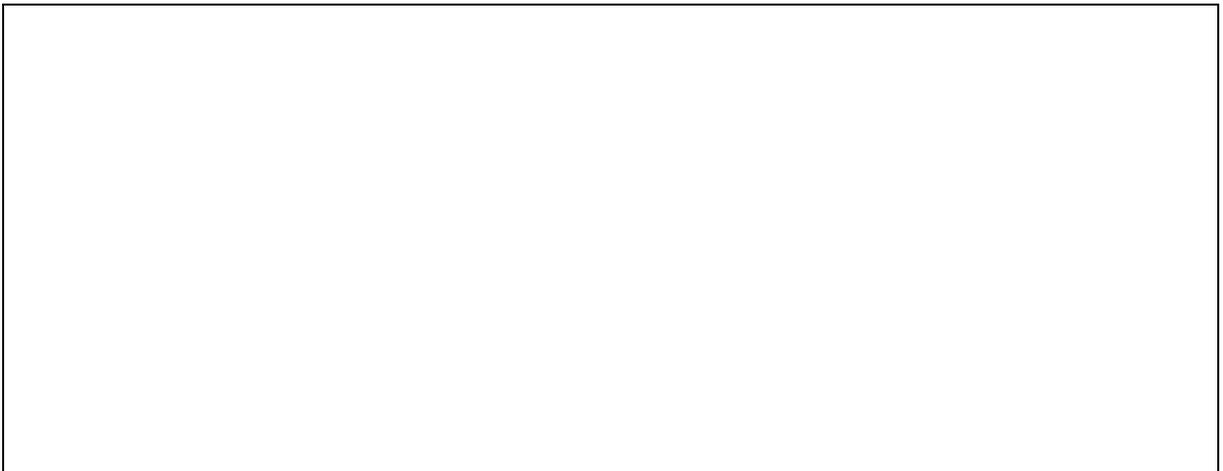
- | | | |
|-------|-------|-------|
| (a) A | (b) B | (c) C |
| (d) D | (e) E | |

3. Explique, de forma sucinta, qual método de estudo você adota para se preparar para as avaliações de Física. Você estuda diariamente? Ou se concentra apenas antes da prova?

4. Suponha que você esteja fazendo uma avaliação teórica de Física. Uma das questões da avaliação você nunca tinha resolvido em sala com seu professor, e você somente pode recorrer aos seus pensamentos. Marque a opção que ilustra sua provável atitude diante da resposta a essa questão:

- (a) deixaria a questão em branco, por que, tenho dificuldade em Física;
- (b) escreveria algumas frases tentando acertar no chute;
- (c) escreveria sobre o primeiro raciocínio que tive, sem pensar muito;
- (d) tentaria escrever uma resposta coerente com algum fenômeno ou situação que já vivenciei;
- (e) buscaria responder usando as questões que já estudei em sala de aula, da mesma forma que o professor passou no quadro.

5. Desenhe, no quadro abaixo, como você imagina ser o átomo, representando suas partes e/ou constituintes.



6. Represente, no quadro abaixo, os conceitos da Mecânica Quântica que você conhece e, se possível, estabeleça alguma relação gráfica entre eles.



Apêndice F – Teste Final

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

TESTE FINAL

NOME: _____ Nº: _____ TURMA: _____

1. No final do século XIX, a teoria mais aceita a respeito da natureza da luz era a _____, que desde meados do século XVIII havia superada a teoria _____, proposta por *Isaac Newton*.

- (a) corpuscular / ondulatória (d) clássica / corpuscular
 (b) ondulatória / relatividade (e) corpuscular / moderna
 (c) ondulatória / corpuscular

2. Quais foram os dois problemas da Física resolvidos, no início do século XX, que serviram para o novo entendimento da natureza da luz, e como estopim para o desenvolvimento da Mecânica Quântica? (escolha duas alternativas)

- () tunelamento () o gato de Schrödinger
 () efeito fotoelétrico () princípio da incerteza
 () dualidade onda-partícula () radiação do corpo negro

3. Baseado na dualidade onda-partícula, *Louis de Broglie* propôs, em 1923, na sua tese de doutorado, que deveria haver simetria entre a luz e a matéria, na teoria que ficou conhecida como ondas de matéria. Das alternativas abaixo, qual melhor explica a proposição de *de Broglie*?

- (a) Se os fótons são onda, então a matéria pode ser composta de partículas
 (b) O comprimento de onda de um elétron é diretamente proporcional à sua energia
 (c) Ficou comprovado que a constante de Planck, por ter um valor muito próximo de zero, não deveria ser considerada nas equações da Mecânica Quântica
 (d) Se a luz possui momentum linear, então a matéria pode apresentar características de onda
 (e) Einstein e Planck estavam errados nas concepções do efeito fotoelétrico e da quantização da energia

4. Explique, de forma sucinta, o que diz o Princípio da Incerteza, proposto por *Werner Heisenberg* em 1927.

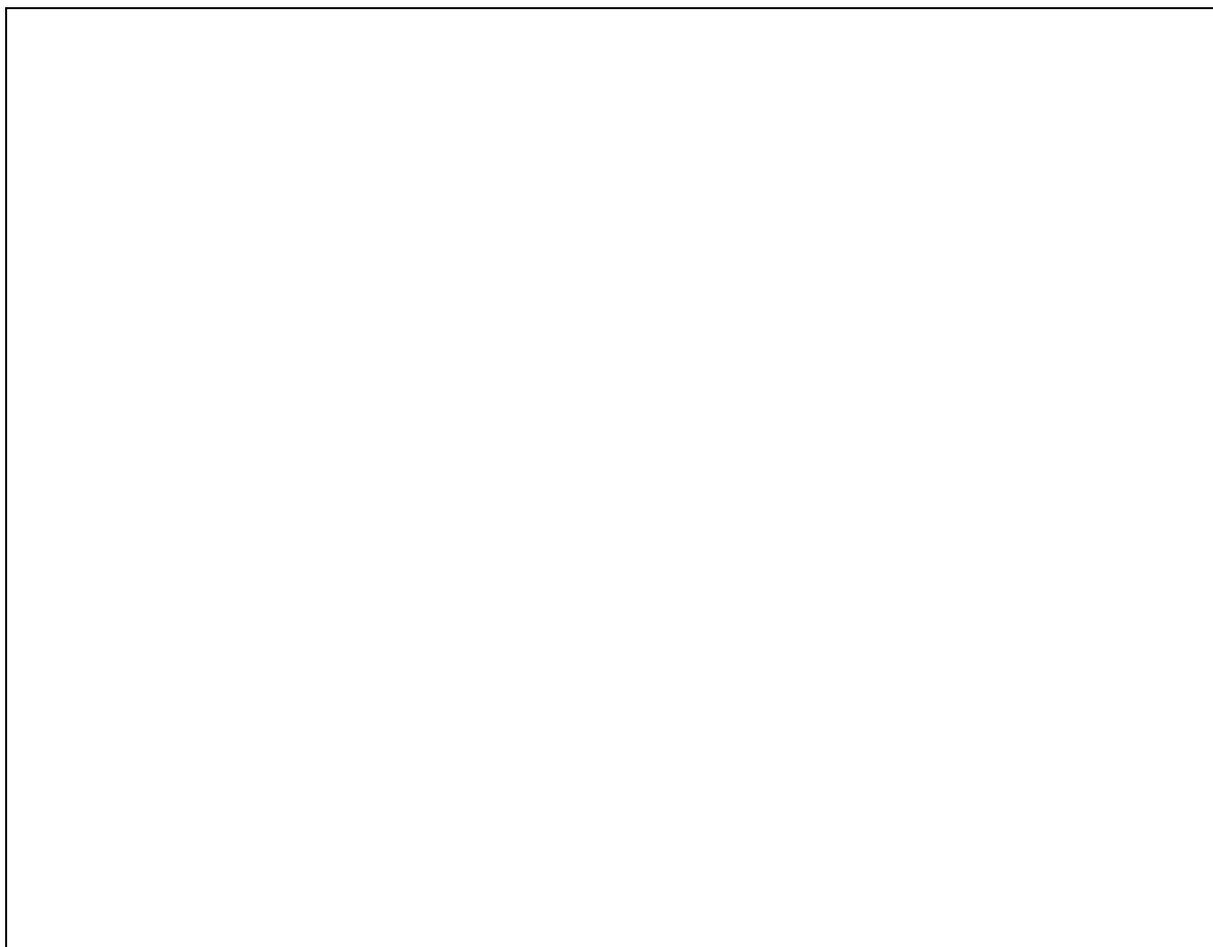
5. A grande vantagem do experimento denominado borracha quântica é que, através dele, podemos constatar boa parte dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica. Abaixo temos, na coluna da esquerda, a relação de alguns desses princípios, e na coluna da direita, a explicação dos mesmos. Relacione, de maneira correta, as duas colunas.

- | | |
|-------------------------------|--|
| (a) função de onda | () interpretação matemática do módulo quadrado da função de onda |
| (b) medição | () coexistência de vários estados possíveis ao mesmo tempo |
| (c) superposição de estados | () equação que descreve o comportamento no tempo e no espaço de uma partícula |
| (d) probabilidade | () resulta da tentativa de medir alguma característica da partícula |
| (e) colapso da função de onda | () ato que acaba por alterar o sistema físico |

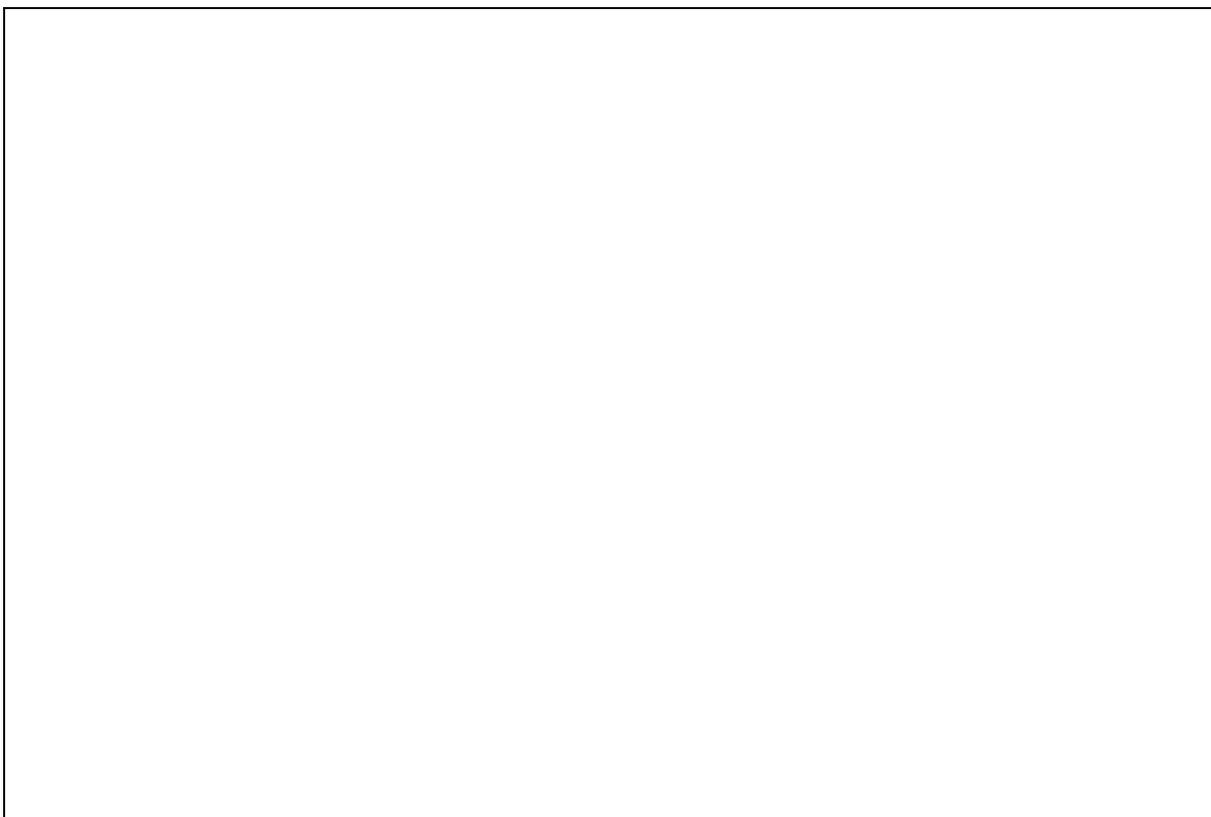
6. O experimento mental denominado “gato de Schrödinger” foi proposto em 1935 por *Erwin Schrödinger*, um dos responsáveis pelo desenvolvimento da Mecânica Quântica, na tentativa de demonstrar o quão estranha era a interpretação da mesma pela vertente denominada “Escola de Copenhague”. Uma das constatações mais intrigantes do experimento era de que o famigerado gato poderia estar, ao mesmo, vivo e morto. Como você explicaria tal fato a outro colega que não participou de nossa oficina?

7. Dos conceitos apresentados na oficina, qual(is), causou(aram) maior surpresa para você? Explique o motivo.

8. Baseado nos conhecimentos compartilhados na oficina, desenhe, no quadro abaixo, como você imagina ser o átomo, representando suas partes e/ou constituintes, e identificando-os.



9. Represente, no quadro abaixo, os conceitos da Mecânica Quântica que apresentaram maior significado para você e, se possível, estabeleça alguma relação gráfica entre eles.



10. Você acha que, de alguma forma, essa oficina foi útil na sua formação no Ensino Médio? Justifique sua resposta, e atribua um valor de um a dez para a importância de nosso estudo.

**SUA CONTRIBUIÇÃO FOI EXTREMAMENTE VALOROSA PARA A EXECUÇÃO
DESTE PROJETO. OBRIGADO E MUITO BOA SORTE NO PROSSEGUIMENTO DE
SEUS ESTUDOS!**

O experimento da borracha quântica:
uso de analogias para o entendimento
do quântico pelo clássico

Luciano Slovinski

Alan Alves Brito

PORTO ALEGRE

2017

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	119
REFERENCIAIS TEÓRICOS	121
PROPOSTA DIDÁTICA	124
Primeiro Encontro: Contextualização histórica e bases do surgimento da Mecânica Quântica no século XX	127
Segundo Encontro: Discussões a respeito da luz: onda ou partícula?	140
Terceiro Encontro: A Mecânica Quântica: principais conceitos e curiosidades	159
Quarto Encontro: A borracha quântica: discussão e apresentação do experimento	176
Quinto Encontro: Contextualização do mundo quântico que nos rodeia.....	195
APÊNDICES	211
Apêndice A – Guia da Aula 1	211
Apêndice B – Guia da Aula 2	213
Apêndice C – Guia da Aula 3	215
Apêndice D – Guia da Aula 4	217
Apêndice E – Teste Inicial.....	219
Apêndice F – Teste Final	221
REFERÊNCIAS	225

APRESENTAÇÃO

Caro Professor(a),

A presente proposta educacional foi planejada para preencher uma lacuna deixada pelos atuais currículos escolares e livros didáticos. Você, que tão bem conhece seus alunos, sabe das suas aspirações e anseios por uma educação mais contextualizada e próxima do momento em que vivemos. A nossa tão querida Física, que fascina a todos nós desde sempre, infelizmente não soa da mesma maneira à maioria dos estudantes, que, por sua vez, sentem-se distantes dos conteúdos discutidos em sala de aula, e principalmente da Física de fronteira, aquela hoje praticada pela comunidade científica. A consequência imediata deste cenário é um desinteresse cada vez maior dos estudantes pela área de Ciências da Natureza, o que acaba por refletir numa baixa procura por cursos superiores desta área do conhecimento, principalmente as licenciaturas, onde se verificam altas taxas de evasão e abandono.

No intuito de fomentar um maior interesse pela Física, e aproximar nossos alunos de um mundo que não pode mais ser separado dos avanços tecnológicos proporcionados pela Mecânica Quântica, é que esta proposta foi pensada. Nela, os conceitos básicos da Mecânica Quântica são discutidos, qualitativamente, através de experimentos reais e virtuais, sempre com a finalidade de desvendar e revelar aos alunos as ideias que estão neles contidos. O debate ocorre dentro de um contexto histórico, iniciando com as discussões a respeito da natureza da luz, do século XVII, e indo até a consolidação da teoria quântica, em meados de 1930. Além disso, sempre que possível, são estabelecidas conexões entre as teorias quântica e clássica, através do uso de analogias. O ápice desta proposta ocorre no quarto encontro, com a apresentação do experimento da borracha quântica, cujos resultados clássicos servem como excelente análogo à interpretação quântica.

As simulações computacionais aqui sugeridas são disponibilizadas *on-line*, gratuitamente, através do endereço eletrônico da Universidade do Colorado na *internet*, havendo também a possibilidade de serem instaladas no seu computador. Devido à complexidade dos temas tratados, percebeu-se, durante a aplicação do projeto, que essas simulações, juntamente com os experimentos reais, se tornaram instrumentos de apoio essenciais para uma melhor compreensão dos conceitos por parte dos alunos, e acredita-se que essas ferramentas de ensino auxiliaram sobremaneira o processo de aprendizagem dos estudantes, segundo o referencial teórico de Ausubel, adotado nesta proposta.

Dessa forma, espera-se que este produto educacional sirva de base a uma aprendizagem pautada na atribuição de significados aos conhecimentos que os estudantes virão a adquirir. Já você, colega professor, pode encontrar nesta obra todos os assuntos necessários ao tratamento dos diversos temas aqui sugeridos, além de indicações de leituras complementares, a fim de tornar sua aula cada vez mais atrativa aos olhos dos estudantes.

Boa sorte!

REFERENCIAIS TEÓRICOS

A abordagem de conceitos de Física Quântica no Ensino Médio requer um cuidado todo especial do professor, uma vez que tais temas são extremamente abstratos e de difícil compreensão por parte dos estudantes.

De modo a atenuar esses problemas, esta proposta educacional é baseada na teoria da *Aprendizagem Significativa de Ausubel*²⁰, segundo a qual todo conhecimento é, por definição, *significativo*. O conceito de *aprendizagem significativa* diz que uma nova informação só fará realmente sentido se puder ser ancorada a outra que já faça parte do arcabouço cognitivo do sujeito. Segundo Ausubel, o estudante só consegue reter para si informações que façam algum sentido ou que possuam algum significado, e só é retida de forma eficiente se puder ser conectada a algum outro conhecimento preexistente. Ou seja, o fator decisivo para a aprendizagem depende do que o estudante já conhece. Essa “bagagem intelectual” foi chamada por Ausubel de *subsunçor*. Como os conceitos de Física Quântica não estão presentes na estrutura cognitiva dos estudantes, esta proposta educacional utilizará os conceitos clássicos como subsunçores, ligando os novos conhecimentos a estes através de analogias entre o clássico e o quântico.

Ausubel também define o conceito de *aprendizagem mecânica*, que é a falta de interação do novo conhecimento com algum já existente, devendo ser evitada sempre que possível. Essa nova informação é armazenada de modo arbitrário, sem nenhuma ligação com algum subsunçor particular. A não interação entre esses conhecimentos pode resultar na falta de significação do novo conhecimento. A simples memorização de fórmulas ou conceitos serve como exemplo de aprendizagem mecânica. No tocante à Mecânica Quântica, a falta de subsunçores específicos requer especial atenção quanto ao tratamento de seus temas, a fim de que os riscos de ocorrência de aprendizagem mecânica sejam atenuados.

Ainda de acordo com Ausubel, para que a aprendizagem significativa ocorra, outras condições devem ser satisfeitas. Uma delas é que o estudante incorpore à sua estrutura cognitiva o conhecimento de um modo que não seja arbitrário ou literal. Quando isso acontece, esse conhecimento é dito *potencialmente significativo*. Outra condição é descrita como a *disposição* do estudante em aprender o que se pretende ensinar. Se o indivíduo se sentir obrigado a reter aquele conhecimento, a aprendizagem será meramente mecânica. O aluno precisa reconhecer a

²⁰ David Paul Ausubel (1918-2008), psiquiatra norte-americano, contribuiu com vários estudos na área da educação, que culminaram com a teoria da Aprendizagem Significativa.

significância daquele conhecimento para poder tomá-lo para si de forma significativa. E esse, talvez, seja o principal papel do professor em sala de aula: despertar o aluno para que reconheça a relevância daquilo que pretende ensinar. Assim, espera-se que o aluno, baseado no experimento da borracha quântica aqui proposto, desenvolva uma compreensão mínima, porém ampla, dos conceitos mais importantes e interessantes que cercam a Mecânica Quântica, e dessa forma possa perceber que as tecnologias que o cercam, quase que na sua totalidade, têm seus princípios fundamentados nos conceitos estudados nesta proposta.

Uma vez que os conceitos de Física Quântica são extremamente abstratos e carregados de um formalismo matemático que foge ao domínio dos estudantes, este produto educacional se utiliza do conceito da *Transposição Didática de Chevallard*²¹, que trata da distância e das modificações sofridas por um saber entre a sua concepção e inserção na sala de aula, dentro dos diversos níveis de ensino. A análise de como se dá a transformação de um conceito dentro dos níveis dos saberes é o foco do trabalho de Chevallard. Para ele, um conceito, quando transposto, passa por severas modificações, mas mantém semelhanças com a ideia original, apesar de adquirir significados próprios do ambiente escolar. Assim, Chevallard espera que os saberes, no contexto do ensino, não sejam meras simplificações dos saberes iniciais, mas sim novos saberes capazes de responder aos domínios da ciência e da sala de aula.

Chevallard classifica os saberes em três níveis básicos. O *Saber Sábio*, concebido sob os pilares das ciências por cientistas e pesquisadores, pertence à sociedade especializada daquela área de conhecimento, pois suas especificidades e particularidades são intrínsecas àquela comunidade. O *Saber a Ensinar*, resultado de uma transposição de algum conceito do Saber Sábio para o ambiente escolar de algum nível do ensino, adquire um caráter didático e é materializado em forma de livros didáticos, por exemplo. E o *Saber Ensinado*, carregado de um didatismo próprio, que é a maneira como o Saber Sábio se apresenta aos estudantes na sala de aula, moldado pela dinâmica da sala de aula, onde ocorre nova transposição. O estudante dará um significado próprio àquele conceito, e esse significado dependerá principalmente dos conceitos anteriormente presentes em sua estrutura cognitiva, segundo a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel.

Segundo Chevallard, o sucesso para a transposição de um conceito depende de uma série de fatores. O conceito deve ser consensual e relevante perante sua comunidade científica e a sociedade. Além disso, deve ser capaz de gerar exercícios e outras formas de avaliação, e

²¹ Yves Chevallard, matemático francês, publicou diversas obras sobre educação, e destacou-se pela proposição da teoria da Transposição Didática.

criar uma identidade própria dentro do ambiente escolar. Esse conjunto de características dá a dimensão do que é necessário para que um conhecimento seja transposto do Saber Sábio, passando pelo Saber a Ensinar, e desembocando no Saber Ensinado, de maneira eficaz. A Mecânica Quântica se encaixa parcialmente nessas condições. Sua relevância perante a sociedade e a comunidade da Física é indiscutível. No entanto, ainda não está inserida no contexto escolar, carecendo de uma maior atenção, principalmente de nós, docentes.

Este produto educacional pretende aliar a ideia da transposição didática de Chevallard à teoria de aprendizagem significativa de Ausubel. Entende-se, aqui, que ambas as teorias são necessárias e fundamentais à introdução de tópicos de FMC, mais especificamente sobre os princípios da Mecânica Quântica, no Ensino Médio. A transposição didática dos conceitos de Mecânica Quântica se faz necessária para que estes se adequem ao nível intelectual do aluno, que dentro da sua estrutura cognitiva, deve dar algum significado a esse novo conhecimento, se possível conectando-o a algum conhecimento preexistente. E espera-se que essa conexão seja facilitada pelo uso de analogias.

PROPOSTA DIDÁTICA

Esta proposta didática foi planejada para acontecer em 5 encontros porque entende que, apesar do tempo ser insuficiente para que sejam tratados todos os temas ligados ao assunto, é o que se pode obter, numa visão otimista, levando-se em consideração os extensos currículos frente à pequena carga horária da disciplina de Física, na porção final do Ensino Médio. Alguns dos assuntos aqui relacionados são apenas mencionados, não sendo discutidos pela absoluta restrição quanto ao tempo de aula.

Os encontros foram estruturados dentro de um contexto lógico, a fim de apresentarem uma significância ao aluno, começando com uma parte inicial introdutória onde, via de regra, são revisitados conceitos tratados em encontros anteriores, seguido de um desenvolvimento, desmembrado em diversos temas, e finalizando com uma pequena conclusão. Alguns encontros dispõem ainda de um apêndice, cuja finalidade é exemplificar ou comentar aspectos do encontro. Todos os encontros contêm ferramentas de apoio ao ensino, como sugestões de experimentos virtuais (simulações computacionais), experimentos reais e vídeos explicativos. A Tabela 1 resume esta proposta educacional, trazendo os principais conceitos clássicos e quânticos trabalhados em cada encontro.

Encontro	Tema	Principais conceitos trabalhados em aula	
		Mecânica Clássica	Mecânica Quântica
1	Contextualização histórica e bases do surgimento da Mecânica Quântica no século XX	Teoria corpuscular da luz Teoria ondulatória da luz	Radiação do corpo negro Quantização da energia de Planck
2	Discussões a respeito da luz: onda ou partícula?	Ondas e suas propriedades Teoria corpuscular de Newton Teoria ondulatória de Huygens	Efeito fotoelétrico
3	A Mecânica Quântica: principais conceitos e curiosidades	-	Dualidade onda-partícula Efeito Compton Ondas de matéria Princípio da incerteza
4	A borracha quântica: discussão e apresentação do experimento	-	Mecânica quântica: função de onda, estado, superposição de estados, probabilidade, medição, colapso da função de onda
5	Contextualização do mundo quântico que nos rodeia	-	Tunelamento quântico Emaranhamento quântico Computação quântica Supercondutividade

Tabela 1: resumo dos conceitos clássicos e quânticos tratados em cada encontro. FONTE: o autor.

Já a Tabela 2 especifica as principais analogias e experimentos sugeridos em cada encontro.

Encontro	Mecânica Clássica (MC)		Analogias	Mecânica Quântica (MQ)	
	Conceitos	Experimentos		Conceitos	Experimentos
1	Teoria corpuscular da luz	-	A luz como partícula (MC)	Radiação do corpo negro	Espectro de emissão de um corpo negro (EV ²²)
	Teoria ondulatória da luz	-	A luz como onda (MC)	Quantização da energia de Planck	Emissão / absorção de energia por átomos (EV)
2	Ondas e suas propriedades	Reflexão, refração, difração, interferência (ER, EV) e polarização (ER) da luz	Ondas eletromagnéticas X Ondas na superfície de um líquido e numa corda (MC)	Efeito fotoelétrico	Efeito fotoelétrico (EV)
	Teoria corpuscular de Newton	-			
	Teoria ondulatória de Huygens	Dupla-fenda de Young (EV)			
3	-	-	O fotón como partícula (MQ)	Dualidade onda-partícula	Experimento de dupla-fenda c/ partículas (EV)
				Efeito Compton	-
			A partícula como onda (MQ)	Ondas de matéria	Experimento de Davisson-Germer (EV)
				Princípio da incerteza	Experimento sobre modelos do átomo de H (EV)

(Continua na próxima página)

²² EV: Experimento virtual; ER: Experimento real.

Encontro	Mecânica Clássica (MC)		Analogias	Mecânica Quântica (MQ)	
	Conceitos	Experimentos		Conceitos	Experimentos
4	-	-	Gato de Schrödinger (MQ)	Mecânica Quântica: função de onda, estado, superposição de estados, probabilidade, medição, colapso da função de onda	Experimento de dupla-fenda c/ partículas (EV)
					Experimento da borracha quântica (ER)
5	-	-	Poço de potencial finito X Energia potencial gravitacional (MQ)	Tunelamento quântico	Tunelamento quântico (EV)
				Emaranhamento quântico	-
				Supercondutividade	-

Tabela 2: Resumo dos conceitos, experimentos e analogias tratados em cada encontro. FONTE: o autor.

Caso o usuário deste produto educacional opte por seguir a metodologia aqui adotada, ainda são disponibilizados, no Apêndice Final, os Testes Inicial e Final utilizados quando da aplicação do projeto, que se encontra refletido nesta proposta. Neles, o professor poderá verificar a necessidade de reforçar ou estruturar alguns dos subsunçores contidos na estrutura cognitiva dos estudantes, e comparar as informações prestadas por eles quando do preenchimento dos Testes Inicial e Final.

Primeiro Encontro: Contextualização histórica e bases do surgimento da Mecânica Quântica no século XX

TEMPO SUGERIDO

90 minutos (2 horas-aula)

Atividade inicial (30 min, opcional)

Aplicação de um teste, a fim de verificar quais conceitos (subsunçores) que serão trabalhados nesta proposta educacional estão presentes na estrutura cognitiva dos alunos. Uma sugestão de teste encontra-se no Apêndice Final

INTRODUÇÃO

Os modelos corpuscular e ondulatório e as discussões a respeito da natureza da luz

A Física, ao fim do século XIX, tinha um panorama bem definido. Suas diversas áreas de concentração estavam quase que esgotadas. A Mecânica tinha seus pilares estabelecidos por *Isaac Newton*²³ desde o século XVII. A teoria era bem aceita, apesar de apresentar alguns problemas, como o tempo como referencial absoluto (ideia modificada pela teoria da relatividade restrita de *Albert Einstein*²⁴ em 1905). A Termodinâmica ainda se encontrava em desenvolvimento (na verdade ainda se encontra, como vários outros campos da Física e da ciência como um todo), mas já tinha bases bem estabelecidas através das ideias de Joule, Kelvin, Clausius, Gibbs, Boltzmann e outros, e não gerava grandes contradições ou discussões a respeito de sua validade. E a Ótica, que por muito tempo era entendida como um campo à parte, foi abrangida pela explicação clássica do eletromagnetismo, através das equações de *James Clerk Maxwell*²⁵.

Particularmente dentro desse campo de estudo, a ótica, ocorreram diversas discussões no decorrer da história, principalmente no tocante à natureza da luz. Historicamente, duas

²³ Isaac Newton (1643-1727), físico e matemático inglês, dentre outras especialidades, idealizador da Mecânica Clássica, também conhecida como Mecânica Newtoniana, e do cálculo diferencial.

²⁴ Albert Einstein (1879-1955), físico alemão, desenvolveu trabalhos em diversas áreas da Física. Formulou a teoria da relatividade e foi premiado com o Nobel de Física em 1921 pela explicação do efeito fotoelétrico.

²⁵ James Clerk Maxwell (1831-1879), físico e matemático escocês, formulou a teoria moderna do Eletromagnetismo Clássico. Seus trabalhos serviram de base ao desenvolvimento da Teoria da Relatividade e da Mecânica Quântica.

grandes correntes divergiam sobre a descrição dos fenômenos luminosos: uma delas entendia a luz como sendo um grande aglomerado de pequenas partículas. Outra, mais moderna, explicava o fenômeno como tendo origem ondulatória.

A teoria corpuscular surgiu ainda na Idade Antiga, entre os séculos V e III a.C., com os filósofos gregos. Dentre outras discussões, havia o entendimento por parte de figuras como Platão e Aristóteles de que a luz era composta de pequenas partículas, assim como a matéria. À época, os fenômenos luminosos eram pouco compreendidos, de forma que a maior discussão girava em torno dos chamados “raios luminosos”. Uma vertente de pensadores afirmava que eles eram percebidos pelos olhos, enquanto outra via alegava que esses raios eram produzidos por eles. Essa questão sobre a natureza da visão só foi esclarecida mais de um milênio depois, com os argumentos de *Al-Hazen*²⁶. A teoria corpuscular, no entanto, permaneceu sem ser comprovada ou combatida até o século XVII, quando Newton propôs a formalização matemática da teoria corpuscular, de maneira coerente com as leis que regiam sua Mecânica. O conceito básico de Newton a respeito da luz era de que a mesma era composta por um fluxo contínuo de pequenas partículas, cujas ações respeitavam as mesmas leis que governavam todos os corpos massivos. Com isso, Newton conseguia explicar, ao seu modo, algumas propriedades da luz, como a refração e a reflexão.

Nesse mesmo período da história, começou a ganhar força outra vertente de pensamento que também se dispunha a explicar a natureza da luz. *Christiaan Huygens*²⁷, propôs uma explicação para os fenômenos da reflexão, refração e difração baseado na teoria ondulatória. Por serem contemporâneos, Newton e Huygens puderam confrontar suas ideias e aprofundar seus estudos na área, que permaneceram em relativo pé de igualdade por aproximadamente um século. Foi quando, em 1800, *Thomas Young*²⁸ propôs o famoso experimento da dupla-fenda. Essa constatação científica retomou as discussões a respeito da natureza da luz, uma vez que forneceu consideráveis indícios de que ela possuía características de onda. Não obstante, na segunda metade do século XIX, Maxwell propôs suas equações para o eletromagnetismo clássico, e provou que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo equivale à velocidade de propagação da luz, corroborando ainda mais a teoria ondulatória. As

²⁶ Abu Ali al-Hasan Ibn Al-Haitham (965-1038), físico e matemático árabe. Apesar de pouco conhecido, prestou uma inestimável contribuição à ciência no estudo dos fenômenos óticos e na elaboração do método científico, durante a Idade Média.

²⁷ Christiaan Huygens (1629-1695), físico e matemático holandês. Se notabilizou pelos estudos relacionados à natureza da luz, particularmente por defender a teoria ondulatória para a explicação dos fenômenos luminosos.

²⁸ Thomas Young (1773-1829), físico e médico britânico. Provou, através do experimento da dupla-fenda, que a luz se comportava como uma onda.

Equações 1 a 5 expressam a constatação de Maxwell. A velocidade c com que uma onda eletromagnética se desloca é dada pela Equação 1. Essa velocidade é uma constante no vácuo, pois é o resultado do produto de duas outras constantes, ϵ_0 e μ_0 , respectivamente a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do vácuo.

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad [1]$$

Sendo os valores de $\epsilon_0 \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, e $\mu_0 \approx 1,25 \times 10^{-6} \text{ H/m}$, tem-se:

$$c \approx \sqrt{\frac{1}{8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 1,25 \times 10^{-6} \text{ H/m}}} \quad [2]$$

Reescrevendo a Equação 2 em termos das unidades de farad (F) e henry (H), tem-se:

$$c \approx \sqrt{\frac{1}{8,85 \times 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m} \cdot 1,25 \times 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}}} \quad [3]$$

$$c \approx \sqrt{\frac{1}{1,11 \times 10^{-17} \text{ s}^2/\text{m}^2}} \quad [4]$$

$$c \approx 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} \quad [5]$$

Com a comprovação de que a luz se deslocava na mesma velocidade de uma onda eletromagnética, a teoria ondulatória ganhou ainda mais argumentos a favor, sobrepujando a teoria corpuscular naquele momento da história. Assim, esse cenário se manteve praticamente inalterado até o fim do século XIX.

DESENVOLVIMENTO

Parte 1 – O problema da radiação do corpo negro

No entanto, a teoria eletromagnética de Maxwell mostrava-se incompleta, pois apesar de integrar a eletricidade e o magnetismo, até então estudados separadamente, e de descrever e prever com perfeição vários fenômenos ligados a estes temas, não conseguia dar conta de alguns problemas, que serão listados mais adiante. Uma parte dos físicos da época não se importava

com isso, achando que esses problemas não eram da teoria em si, mas sim do aparato experimental utilizado para verificá-los. Outros até levavam esses problemas em consideração, mas não se atinham a eles, acreditando que mais cedo ou mais tarde a solução apareceria. Já uma pequena parcela de pesquisadores não aceitava aquele cenário, e tentava resolver esses problemas a qualquer custo.

Um dos problemas apresentados pela teoria eletromagnética era a falta de uma explicação para a chamada *radiação do corpo negro*. Um corpo negro ideal é um corpo hipotético que emite (ou absorve) radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda, de forma que toda a radiação incidente é completamente absorvida, e em todos os comprimentos de onda e todas as direções a máxima radiação possível para a temperatura do corpo é emitida. Ele também recebe essa denominação por sua capacidade de absorver toda a radiação que nele incide, pois assim parece negro à visão humana. O problema relacionado à radiação emitida por um corpo negro consiste na discordância entre o modelo previsto pela teoria eletromagnética e o constatado experimentalmente. A Figura 1 apresenta alguns resultados experimentais, comparados à previsão teórica segundo a chamada lei de *Rayleigh-Jeans*, que se baseava na teoria eletromagnética clássica.

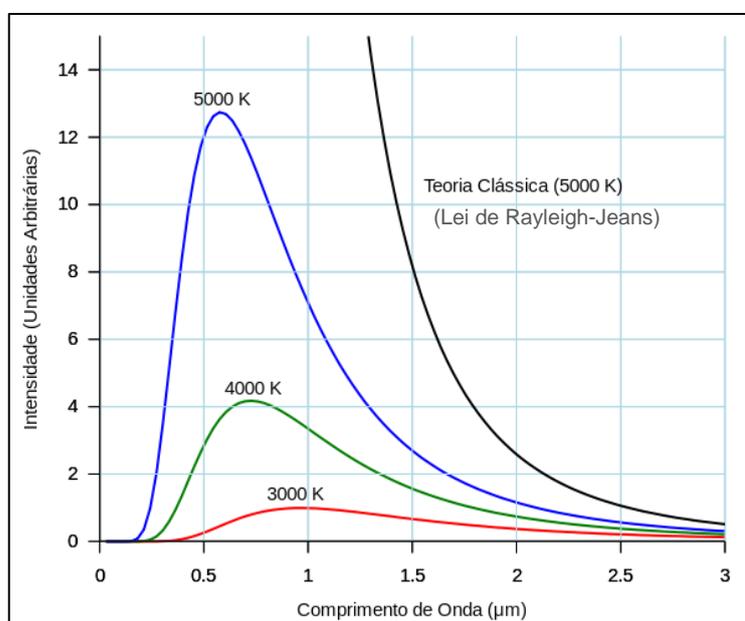


Figura 1: resultados experimentais e teórico para diversas curvas de temperatura de um corpo negro²⁹.

O gráfico apresentado pela Figura 1 traz a intensidade de emissão (ou emissividade), representada no eixo vertical, em função do comprimento de onda da radiação, constante do

²⁹ Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Corpo_negro#/media/File:Corpo_negro.svg, adaptada.

eixo horizontal. Nele, as linhas coloridas mostram o comportamento experimental observado para algumas temperaturas, que em baixas intensidades ou maiores comprimentos de onda até se aproximam do resultado teórico, representado pela curva preta. No entanto, esta mesma curva preta sinaliza o comportamento teórico esperado para uma temperatura de 5000K, onde a intensidade da radiação emitida pelo corpo tende ao infinito, e que definitivamente não condiz com o observado experimentalmente. Ou seja, a teoria eletromagnética apresentava uma grave falha. Nota-se que, conforme a temperatura do corpo aumenta, os picos das curvas de intensidade deslocam-se para comprimentos de onda cada vez menores, até que a curva se torna uma exponencial, pelo modelo teórico. Esse resultado teórico ficou conhecido como a *catástrofe do ultravioleta*.

A fim de explorar melhor o tema, sugere-se a utilização de uma simulação computacional sobre o espectro de emissão de um corpo negro.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 1

Espectro de emissão de um corpo negro³⁰

- Descrição sumária: simulação que permite verificar como se dá a distribuição da intensidade de radiação de um corpo, numa determinada temperatura, em função dos seus diversos comprimentos de onda. Ou seja, ela mostra a curva espectral de um corpo, baseado em sua temperatura.
- Possibilidades educacionais: a simulação possibilita que se insira uma temperatura qualquer, em escala absoluta, e automaticamente ajusta a curva espectral num gráfico que mostra seu comportamento. Existem algumas temperaturas predefinidas de corpos como o Sol, uma lâmpada incandescente, um forno e a Terra, mas qualquer temperatura pode ser inserida de forma manual ou com o auxílio de um botão. Dependendo da temperatura escolhida, há a necessidade de se ajustar a escala do gráfico através de botões existentes em ambos os eixos. Por fim, no alto, um mostrador exibe qual é a percepção visual da cor predominante atribuída à temperatura escolhida.

³⁰ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/blackbody-spectrum. Acesso em 03/02/17.

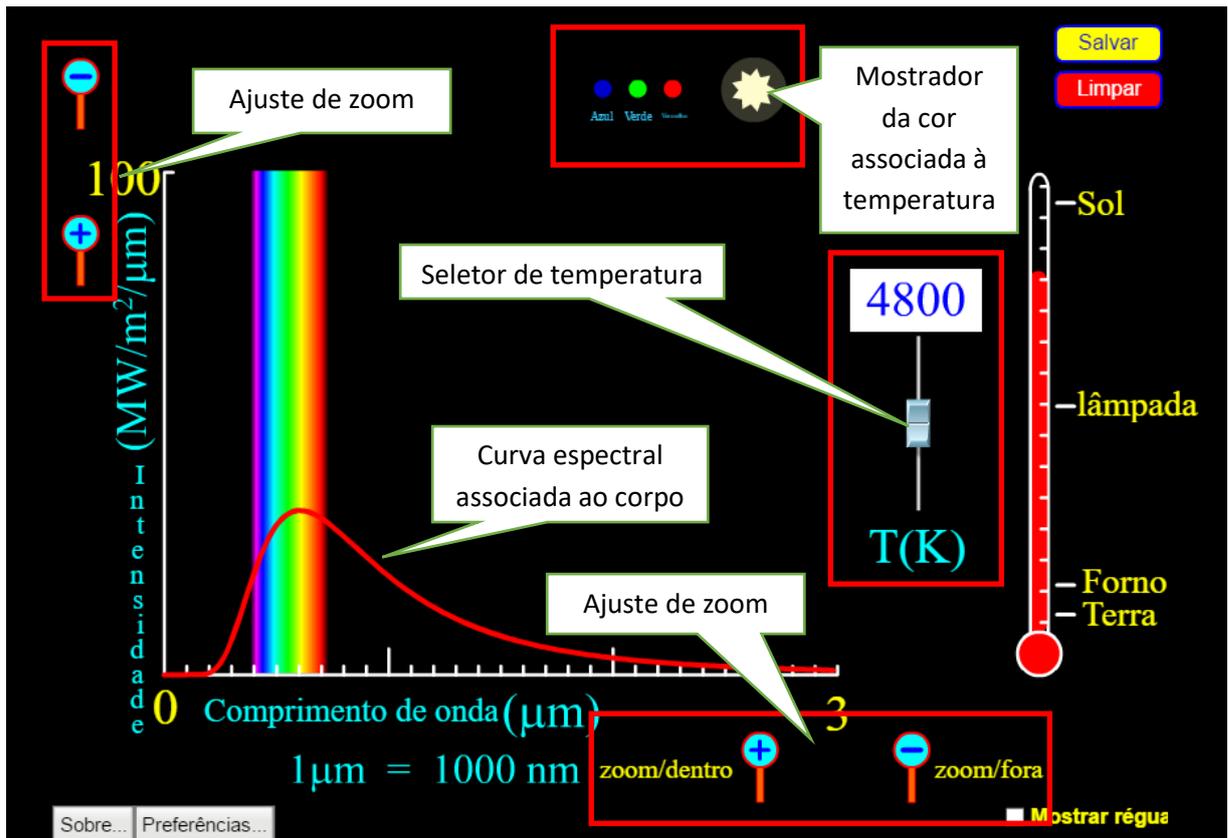


Figura 2: simulação computacional sobre o espectro de emissão de um corpo negro. FONTE: captura de tela.

- Forma de utilização: a simulação permite a visualização da curva de emissão de um corpo negro, com especial ênfase aos picos de emissão. Como o corpo negro emite em toda a faixa do espectro eletromagnético, os picos sinalizam a faixa de frequências onde ocorrem as maiores taxas de emissão. Assim, se o pico de emissão estiver na faixa do visível, o olho humano será sensibilizado por todas as frequências relacionadas às cores que se pode perceber, e tem-se a percepção da cor branca, como mostra a Figura 2. Conforme o pico se afasta em direção a maiores comprimentos de onda (infravermelho), passa-se a perceber apenas comprimentos de onda correspondentes à cor vermelha, mas caso o pico rume na direção oposta (ultravioleta), a cor percebida será a violeta. Quando o pico de emissão estiver afastado da faixa do visível, nenhuma cor é percebida pelo olho. É importante que o aluno entenda que qualquer corpo se comporta (aproximadamente) como um corpo negro, porque a ele está relacionada uma temperatura, e isso faz com que o mesmo emita radiação. Como exemplo, com o auxílio de um termômetro infravermelho, é possível estipular-se a temperatura de alguns corpos presentes na sala de aula, como mesas, paredes, e o próprio corpo humano. A seguir, essas temperaturas podem ser inseridas na simulação, que por sua vez irá gerar as curvas dos espectros de emissão desses corpos. Como essas temperaturas variam entre 300K e 400K, os picos de emissão se encontrarão dentro da faixa do infravermelho e bastante distantes da faixa

do visível, corroborando o fato de que o olho humano não é sensibilizado por radiações com essa frequência. Aqui, como forma de contextualização da aula, pode-se explorar o funcionamento dos aparelhos de visão noturna, que trabalham nessa faixa do espectro. A fim de diversificar os exemplos, pode-se convidar os alunos a preencher as duas últimas colunas da Tabela 3, constante do Guia da Aula 1.

Corpo	Temperatura³¹ (K³²)	Comprimento de onda (nm)	Faixa do espectro eletromagnético (pico)
Terra	300	~ 12000	IV
Forno	660	~ 9000	IV
Filamento lâmpada	3000	~ 1000	IV
Sol	5700	~ 550	Visível
Lava	1300	~ 2500	IV
Gigante Vermelha	4500	~ 650	Visível
Gigante Azul	20000	~ 200	UV
Anã Branca	25000	~ 100	UV
Anã Marrom	2000	~ 1500	IV
N (líquido)	75	~ 40000	IV
He (líquido)	4	~ 700000	Limite IV - micro-ondas
He (sólido)	1	~ 3000000	Micro-ondas

Tabela 3: exemplos de corpos negros, com respectivas temperaturas, comprimentos de onda e faixa do EEM ao qual pertencem. As duas últimas colunas devem ser preenchidas pelos alunos. FONTE: o autor.

DESENVOLVIMENTO

Parte 2 – Planck e a quantização da energia

Um dos pesquisadores que não se contentava com o panorama da Física do fim do século XIX, onde haviam poucas perguntas sem resposta, era *Max Planck*³³. Planck chegou a

³¹ As temperaturas do Sol e das outras estrelas referem-se à superfície das mesmas.

³² A escala kelvin (K) é base do Sistema Internacional, também chamada de temperatura absoluta. Para convertê-la em graus Celsius (°C), é necessário somar 273,15 à temperatura kelvin em questão.

³³ Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), físico alemão. Seu trabalho inaugurou o ramo da Física Quântica. Por sua imensa colaboração, foi premiado com o Nobel de Física em 1918.

ser aconselhado a não se dedicar à Física, uma vez que, pelo entendimento da época, quase tudo na área já havia sido descoberto, restando apenas o preenchimento de alguns buracos na teoria (um deles, a radiação do corpo negro). Assim, Planck se debruçou justamente sobre este problema. Após várias tentativas frustradas de resolver a questão, ele, numa atitude quase que desesperada, propôs que a energia associada a um corpo negro não poderia variar de maneira contínua, mas sim assumir determinados valores estabelecidos por uma simples Equação matemática (Equação 6) que ajustava a curva de temperaturas do modelo teórico com os dados obtidos experimentalmente.

$$E = hf \quad [6]$$

Na Equação 6, a energia E é proporcional à frequência f , ajustada por uma constante obtida experimentalmente por Planck. Essa constante foi batizada em homenagem a ele, e seu valor é $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$.

Um exemplo da quantização proposta por Planck pode ser visualizado ao se analisar o espectro de emissão de um átomo. A Figura 3 traz o espectro de emissão de alguns elementos químicos, que se encontram na faixa do espectro eletromagnético visível.

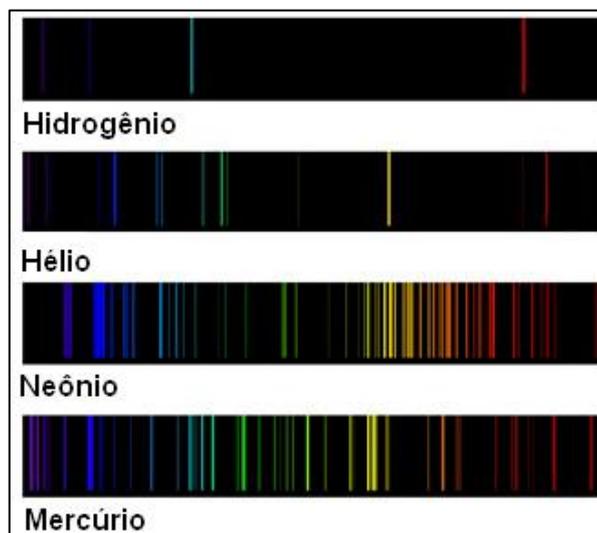


Figura 3: espectro de emissão de diferentes elementos químicos³⁴.

O que se percebe, analisando a Figura 3, é que diferentes elementos apresentam diferentes linhas de emissão. O espectro, então, pode ser interpretado como sendo a impressão digital de um elemento químico. Todos os átomos de um determinado elemento apresentam um

³⁴ Fonte: <http://brasilecola.uol.com.br/quimica/espectros-emissao-absorcao-leis-kirchhoff.htm>.

mesmo espectro de emissão, de modo que a análise do espectro de emissão de um corpo desconhecido pode determinar a composição química do corpo. O aparelho que realiza esse tipo de análise é chamado *espectrômetro*, que será melhor discutido no Apêndice 1.

Mas no que consiste a emissão de luz por um corpo? Basicamente, da excitação dos seus átomos, que é a energização dos mesmos, fazendo com que seus elétrons transitem entre suas órbitas permitidas.

Aqui recomenda-se a utilização de outra simulação computacional, a fim de ilustrar e exemplificar o processo de emissão e absorção de energias por um átomo. A simulação sugerida é a que mostra como funcionam as lâmpadas de descarga (também conhecidas como lâmpadas fluorescentes).

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 2

Lâmpadas de neônio e outras lâmpadas de descarga³⁵

- Descrição sumária: a simulação permite entender como é o funcionamento de uma lâmpada de descarga, através do bombardeamento, por elétrons, de átomos de um gás rarefeito, encapsulados numa ampola. No entanto, é de especial interesse entender a maneira como ocorre a emissão e a absorção de energias por este átomo.

- Possibilidades educacionais: entender o funcionamento de uma lâmpada de descarga é apenas uma das possibilidades da simulação. Mais do que isso, ela propicia o entendimento da forma como se dá a emissão de fótons pelos átomos, através da transição dos estados de energia do átomo. Existe a possibilidade de simular o comportamento de um ou vários átomos, de se visualizar um espectrômetro que conta individualmente os fótons emitidos, e de perceber como se dá a transição entre os níveis de energia de um átomo, através de um diagrama. Ainda pode-se escolher entre átomos de hidrogênio, mercúrio, sódio e neônio, que irão gerar diferentes linhas espectrais e, conseqüentemente, radiações de diferentes frequências.

- Forma de utilização: a simulação é uma ótima maneira de, num curto intervalo de tempo, tentar fazer com que os alunos percebam como se dá o processo de emissão e absorção de fótons pelos átomos, através da excitação dos mesmos. Essa tarefa pode parecer bastante difícil, pois talvez os alunos não possuam os subsunçores necessários para tal. Então, a estratégia aqui sugerida é optar por uma explicação sumária do fenômeno a partir da

³⁵ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/discharge-lamps. Acesso em 03/02/17.

visualização da simulação. A compreensão desse conceito é importante, pois contextualiza a noção de quantização da energia proposta por Planck. O aluno deve entender que a emissão de um fóton de certa frequência corresponde a uma determinada energia, e que essas energias são bem determinadas e correspondem às transições entre os estados possíveis para o átomo.

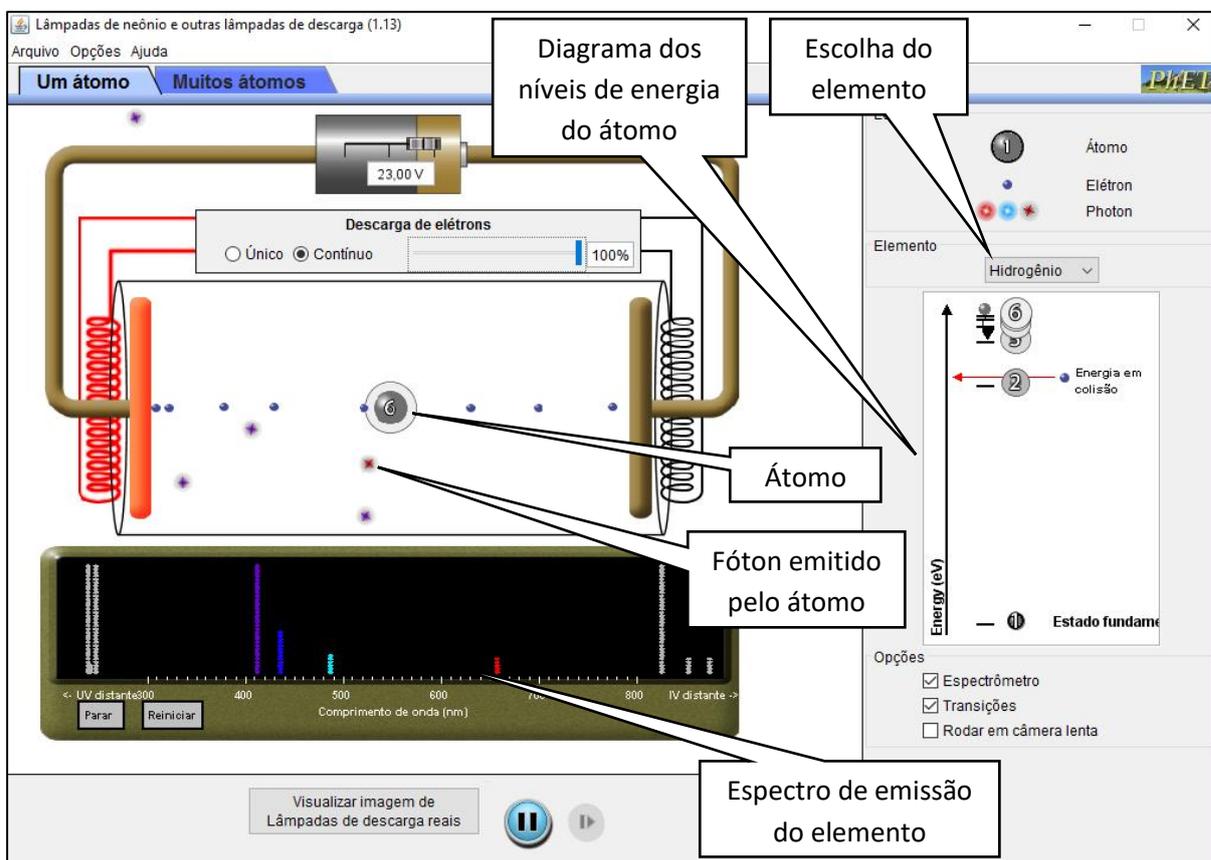


Figura 4: simulação computacional sobre lâmpadas de neônio e outras lâmpadas de descarga. FONTE: captura de tela.

CONCLUSÃO

As energias são discretas

A teoria de Planck foi revolucionária para a Física da época, e considerada o marco inicial da Mecânica Quântica. Dentre várias implicações, a mais dramática é que as energias associadas às partículas não podiam mais ser contínuas, ou seja, assumir qualquer valor. De agora em diante, as energias deveriam ser múltiplas de um valor h , a Constante de Planck, e entendidas como sendo compostas de pequenos pacotes, que mais tarde foram denominados *quanta* (plural de *quantum*, que em latim significa quantidade). Isso causou um grande mal-estar entre os físicos da época, que ficaram extremamente incomodados com a explicação

proposta por Planck. Na verdade, nem mesmo Planck sabia como explicar sua solução, chagando a dizer que a teoria era um ato de desespero. Essa explicação só veio em 1905, com a resposta de Einstein para outro problema da época: o efeito fotoelétrico, conceito discutido na proposta do Segundo Encontro.

APÊNDICE 1

As linhas espectrais

As linhas do espectro de emissão ou absorção de um material podem ser entendidas como a impressão digital daquela substância. A visualização de tais linhas é realizada através de um eletroscópio, aparelho de simples funcionamento que pode ser encontrado sem grande dificuldade em laboratórios de física, caso a escola possua um. A Figura 5 traz o esquema de funcionamento simplificado de um eletroscópio. A luz emitida por uma fonte passa por uma pequena fenda, cuja finalidade é estreitar o feixe luminoso. Este feixe então encontra um prisma, que por sua vez tem a função de difratar o já estreito feixe. Por fim, o resultado é projetado em um anteparo, onde a visualização das linhas espectrais é facilitada.

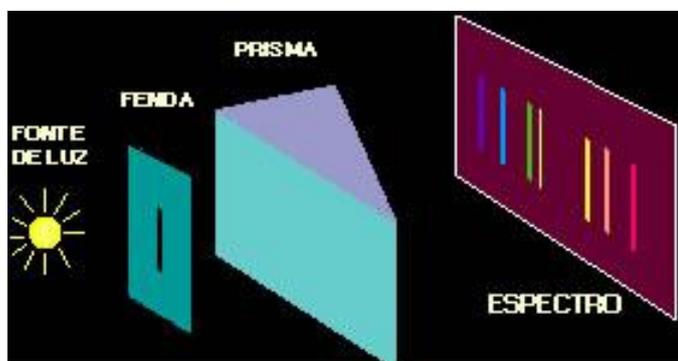


Figura 5: esquema de um espectroscópio simples³⁶.

Diferentes materiais apresentam diferentes linhas espectrais, como bem mostrou a figura 3. Além disso, como discutido anteriormente, todo corpo pode ser aproximado a um corpo negro, com maior ou menor eficiência. Assim, todo corpo pode emitir e absorver radiação eletromagnética. Dessa forma, todo corpo possui um espectro de emissão e um espectro de absorção bem definidos, de forma que o conjunto de linhas espectrais desses dois espectros

³⁶ Fonte: <http://alunosonline.uol.com.br/quimica/espectros-dos-elementos.html>.

compreende todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. A Figura 6 exemplifica tal situação, mostrando apenas a faixa do espectro visível.

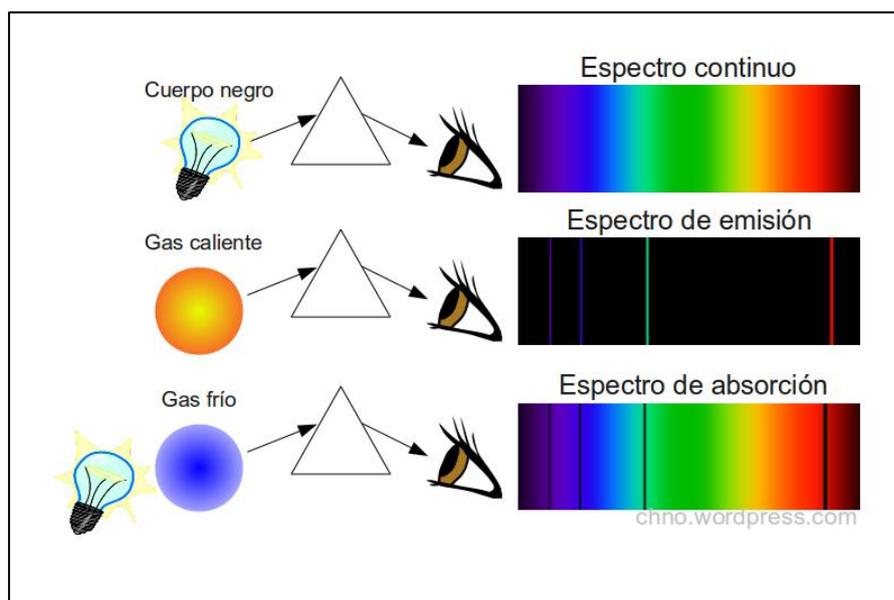


Figura 6: exemplos de espectros de emissão e absorção³⁷.

Pode-se observar, na Figura 6, que corpos que se aproximam de um corpo negro ideal conseguem emitir radiação numa ampla faixa do espectro, como é o caso da lâmpada. Um gás aquecido por sua vez, consegue emitir radiação em apenas alguns comprimentos de onda, e seu espectro de emissão será bastante discreto. Já o mesmo gás, resfriado, absorve radiação com os mesmos comprimentos de onda na qual emite. O conjunto de linhas espectrais de emissão e absorção contemplam toda a faixa do espectro visível, podendo-se entender como sendo uma um “negativo” da outra.

Por outro lado, Planck propôs uma equação (Equação 6) que estabelecia uma relação direta entre energia e frequência da radiação, algo inédito até então. O que se sabia, à época, era que a energia se relacionava com a temperatura, como mostra a Equação 7, onde k_B é a constante de Boltzmann³⁸, e T é a temperatura da amostra.

$$E = k_B T \quad [7]$$

³⁷ Fonte: <http://ies.rosachacel.colmenarviejo.educa.madrid.org/luz/?p=408>.

³⁸ A constante de Boltzmann é uma constante que relaciona a temperatura e a energia das moléculas. Foi determinada experimentalmente pelo físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) e seu valor experimental atual é $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

Igualando as equações 6 e 7, chega-se à Equação 8, onde pode-se perceber que a frequência da radiação emitida por um corpo negro é diretamente proporcional à sua temperatura.

$$hf = k_B T \quad [8]$$

Como a frequência e o comprimento de onda são grandezas inversamente proporcionais, então os maiores comprimentos de onda estão associados às menores frequências, e vice-versa. Assim, analisando a faixa visível do espectro eletromagnético, percebe-se que às menores temperaturas estão associados os maiores comprimentos de onda (faixa próxima ao vermelho), ao passo que as maiores temperaturas correspondem aos menores comprimentos de onda (faixa próxima ao violeta). Essas duas cores delimitam os extremos do espectro eletromagnético visível. Comprimentos de onda menores já começam a se localizar na região do ultravioleta, e os maiores, na região do infravermelho. A Figura 7 mostra um esquema com as diversas faixas que compõem o espectro eletromagnético.

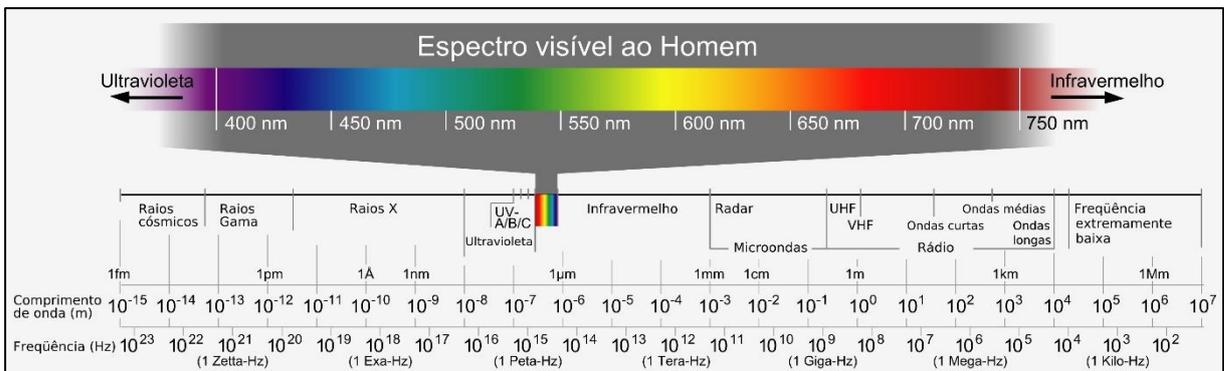


Figura 7: faixa do espectro eletromagnético, com ênfase no espectro visível ao homem³⁹.

³⁹ Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_vis%C3%ADvel.

Segundo Encontro: Discussões a respeito da luz: onda ou partícula?

TEMPO SUGERIDO

90 minutos (2 horas-aula)

INTRODUÇÃO

O entendimento da luz ao fim do século XIX

Voltando ao final do século XIX, praticamente não havia mais dúvidas de que a luz se comportava como uma onda. A própria Física, inclusive, era considerada quase que totalmente explorada, motivo este que tornava a área de estudo pouco atraente às mentes da época.

Mas por que, exatamente, a luz era entendida como uma onda? A explicação para esta questão vinha da comparação da luz com outros meios, já que a luz exibia comportamento semelhante a estes meios que apresentavam características ondulatórias, como por exemplo, a água. Sendo assim, deve-se explorar antes as principais características de uma onda, o que será feito a seguir.

DESENVOLVIMENTO

Parte 1 – A luz como uma onda

Existem várias definições cabíveis para uma onda. Entre elas, pode-se afirmar que uma onda é uma perturbação oscilante que se propaga em um meio, de maneira periódica, onde há somente o transporte de energia, numa espécie de movimento harmônico simples. Ondas podem ocorrer em meios onde haja matéria (ondas mecânicas) ou não (ondas eletromagnéticas e gravitacionais). São exemplos de ondas mecânicas as que ocorrem na superfície dos líquidos (mares, lagos, etc.), nos gases (som) e nos sólidos (ondas sísmicas).

A principal característica de uma onda (que inclusive é intrínseca e não se altera) é a sua frequência (f), e depende unicamente da fonte que a gerou. A frequência de uma onda indica o número de vezes que a oscilação ocorre em um determinado intervalo de tempo. Quando esse intervalo equivale a um segundo, a unidade do Sistema Internacional (SI)

relacionada a esta grandeza física é denominada hertz (Hz), em homenagem ao físico alemão *Heinrich Hertz*⁴⁰.

Outra característica de uma onda é o comprimento de onda (λ), que é a distância entre dois pontos iguais e consecutivos de uma onda, normalmente duas cristas ou dois vales. A magnitude de uma onda é chamada amplitude (A), e o tempo necessário para que ocorra uma oscilação completa é dito período (T). A Figura 8 traz algumas dessas características citadas.

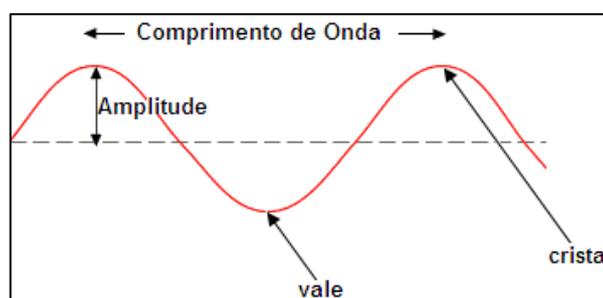


Figura 8: representação esquemática de uma onda⁴¹.

Quanto à direção de vibração, uma onda é dita longitudinal quando a oscilação ocorre na mesma direção da propagação da onda, como as ondas sonoras. Quando a vibração ocorre perpendicularmente à direção de propagação da onda, essa é chamada transversal. Como exemplo de ondas transversais tem-se as ondas na superfície de um líquido, em uma corda ou as ondas eletromagnéticas. A Figura 9 mostra as possíveis direções de vibração de uma onda.

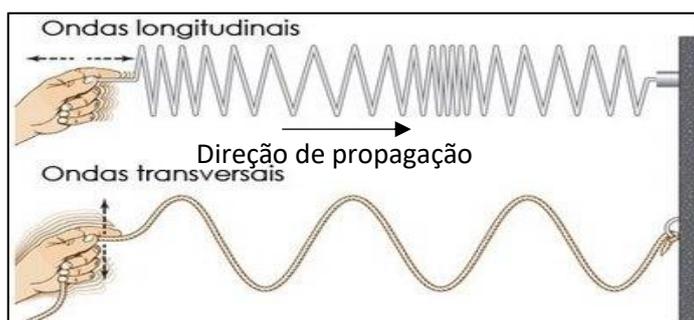


Figura 9: direções de vibração de uma onda⁴².

Já quanto à direção de propagação, uma onda pode ser unidimensional, quando se desloca em uma dimensão (ondas em uma corda), bidimensional, quando se desloca em duas

⁴⁰ Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), físico alemão. Deu grande contribuição no estudo do eletromagnetismo, particularmente ao corroborar o trabalho de Maxwell.

⁴¹ Fonte: <https://brainly.com.br/tarefa/1174883>.

⁴² Fonte: <http://www.explicatorium.com/cfq-8/caracteristicas-das-ondas.html>, adaptada.

dimensões (ondas na superfície de um líquido), ou tridimensional, quando se desloca nas três dimensões espaciais (ondas sonoras e ondas eletromagnéticas).

A seguir serão abordadas e explicadas as principais propriedades das ondas, que virão servir de subsídio aos fenômenos aqui estudados, mais particularmente aos fenômenos clássicos e seus análogos quânticos, quando da apresentação do experimento da borracha quântica, no Quarto Encontro.

- **Reflexão:** é o fenômeno que ocorre quando uma onda encontra um obstáculo e não consegue transpô-lo. Nesse caso, a onda é refletida na mesma direção que se propagava (Figura 10), caso a direção de propagação seja perpendicular ao obstáculo. Quando a direção de propagação formar qualquer outro ângulo com o obstáculo, então o ângulo de reflexão será sempre igual ao ângulo de incidência.

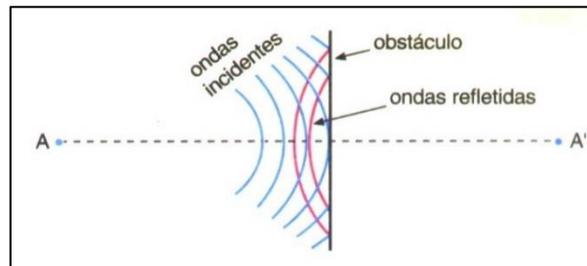


Figura 10: reflexão de uma onda⁴³.

- **Refração:** propriedade que descreve o fenômeno que ocorre quando uma onda passa de um meio para outro, de características distintas do inicial. A onda refratada, devido à mudança do meio, tem sua velocidade e comprimento alterados, a fim de que a frequência permaneça a mesma (daí a frequência ser uma característica imutável numa onda). A Figura 11 representa como ocorre a refração numa corda de diferentes densidades, onde um pulso incidente sofre processos de reflexão e refração simultâneos.

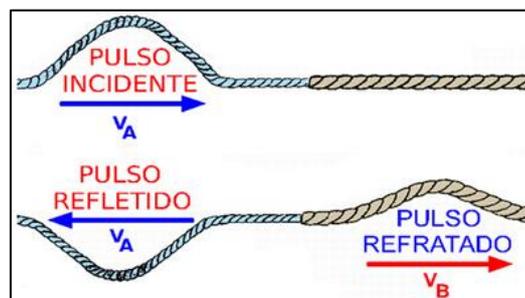


Figura 11: refração de uma onda numa corda de diferentes densidades⁴⁴.

⁴³ Fonte: <http://ww2.unime.it/weblab/awardarchivio/ondulatoria/ondas.htm>.

⁴⁴ Fonte: <http://alunosonline.uol.com.br/fisica/refracao-ondas-uma-corda.html>.

- **Difração:** capacidade que uma onda possui de contornar obstáculos. Uma barreira (ou o oposto, uma fenda) qualquer é dita obstáculo para uma onda quando seu tamanho for comparável ao comprimento da onda que nele incide (ou pelo menos da mesma ordem de grandeza). Se essa barreira ou fenda forem muito maiores ou menores que o comprimento da onda, a difração não ocorrerá, ou então será atenuada. A Figura 12 traz algumas configurações possíveis para o fenômeno. Na imagem superior esquerda, tem-se um obstáculo (fenda) muito largo para a onda incidente, logo a difração é mínima. Já nas figuras ao lado, a fenda é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. Assim, a difração ocorre de modo mais pronunciado. Percebe-se, ainda, que o obstáculo funciona como uma nova fonte daquela onda, mantendo as características da mesma.

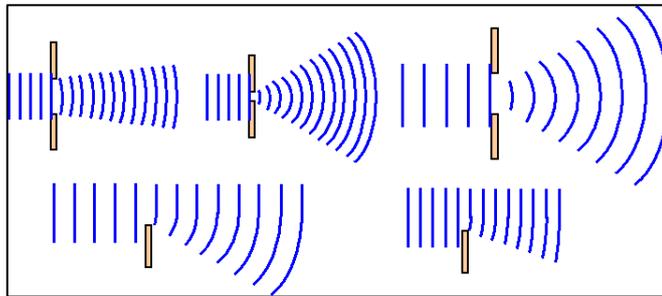


Figura 12: diversas configurações possíveis para o fenômeno da difração⁴⁵.

Já nas imagens inferiores, observa-se outra peculiaridade das ondas: a capacidade de contornar objetos, que também funcionam como obstáculos. Assim, quanto mais o comprimento de onda se aproximar do tamanho do obstáculo, mais contundente será o fenômeno da difração. A Figura 13 traz um esquema de como ondas de rádio, de grande comprimento de onda (entre 1m e 1 km), conseguem contornar grandes obstáculos, como montanhas. Pode-se perceber que a antena localizada no prédio recebe o sinal da onda graças à capacidade que a mesma tem de difratar.

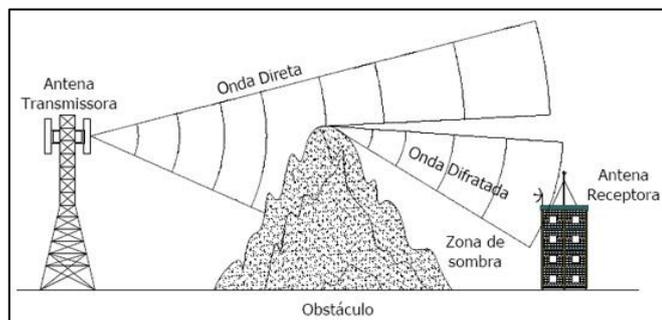


Figura 13: difração de ondas de rádio⁴⁶ (contorno de obstáculos).

⁴⁵ Fonte: <http://alunosonline.uol.com.br/fisica/difracao.html>.

⁴⁶ Fonte: <http://www.ibytes.com.br/a-difracao-das-ondas-eletromagneticas-devido-a-obstaculos>.

- **Interferência:** é a adição ou subtração das amplitudes de duas ou mais ondas, resultando numa onda superposta. A amplitude final dependerá da fase das ondas iniciais. Se as ondas estiverem em fase, então a interferência é dita construtiva. Caso as ondas encontrem-se em fases opostas, tem-se a interferência destrutiva. Qualquer outra combinação resultará numa onda com amplitude intermediária. A Figura 14 exemplifica as duas primeiras situações descritas.

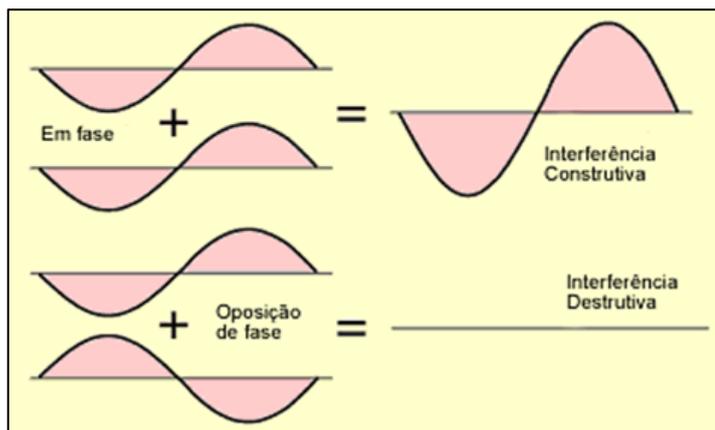


Figura 14: interferência construtiva e destrutiva⁴⁷.

Já a Figura 15 mostra o padrão de interferência gerado por duas fontes de ondas (pontos escuros) na superfície de um líquido. Conforme se afastam das fontes, as ondas começam a formar um padrão intercalado de interferências construtivas e destrutivas. Esses padrões são de especial interesse nessa proposta educacional, principalmente quando da abordagem do experimento da borracha quântica.

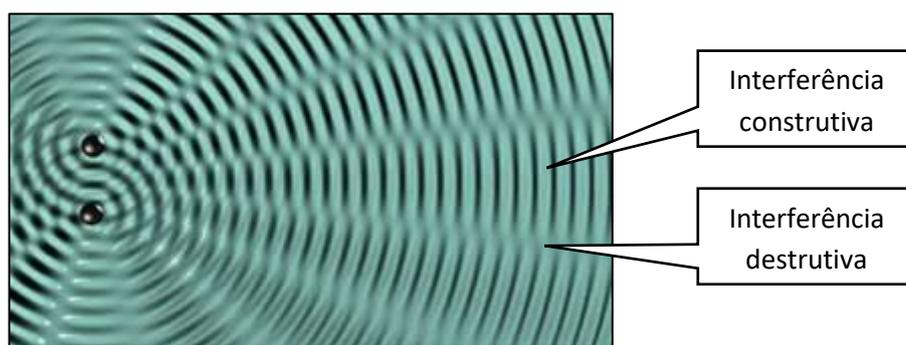


Figura 15: interferência de ondas na superfície de um líquido⁴⁸.

- **Polarização:** trata-se da ordenação da direção de oscilação no plano perpendicular à direção de propagação de uma onda. Uma onda não polarizada pode oscilar em

⁴⁷ Fonte: <https://alemdainercia.wordpress.com/2016/02/16/fisica-moderna-interferencia-e-difracao-de-luz>.

⁴⁸ Fonte: <http://eppursimuove.ugr.es/Top10Physics/InterferenciaLuz/InterferenciaLuz.html>.

qualquer direção no plano perpendicular à direção de propagação. Ao passar por um filtro, chamado filtro polarizador, a onda passará a oscilar em apenas uma direção. A Figura 16 mostra uma pessoa balançando uma corda, de forma a gerar ondas circulares, cuja direção de propagação vai da pessoa à parede. Como a onda é circular, ela oscila em todas as direções possíveis. No entanto, no caminho da onda há um filtro polarizador orientado verticalmente. Assim, ao passar pelo filtro, a onda passa a oscilar apenas na direção vertical, pois as outras direções de oscilação não são mais permitidas.

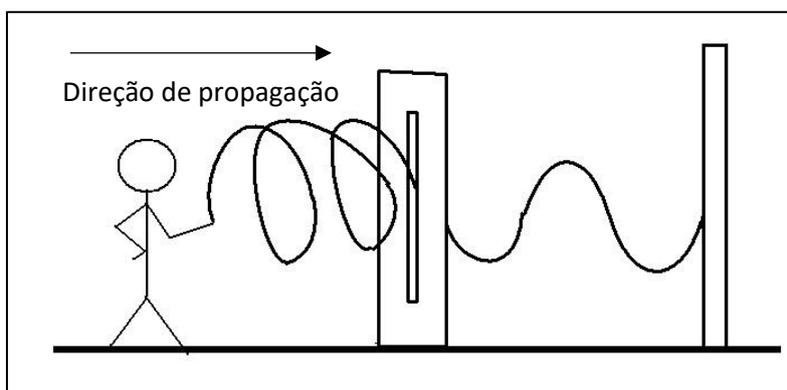


Figura 16: polarização de ondas em uma corda⁴⁹.

Como forma de ilustrar as principais propriedades das ondas, indica-se aqui a seguinte estratégia: caso a escola possua um laboratório de Física, sugere-se que tais propriedades sejam demonstradas de maneira experimental numa cuba d'água, de forma que os alunos verifiquem inicialmente um experimento real. Após isso, pode-se utilizar uma simulação computacional, onde as mesmas propriedades podem ser observadas num experimento virtual. A intenção de tal metodologia é mostrar ao estudante que uma simulação computacional pode ser confiável, pois o resultado é o mesmo que quando verificado num experimento real. Assim, a simulação aqui sugerida é a que trata da interferência de ondas.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 3

Interferência de ondas⁵⁰

- Descrição sumária: apesar do título aparentemente restringir seu uso, a simulação permite visualizar não só o fenômeno da interferência de ondas, mas também a

⁴⁹ Fonte: <http://soumaisenem.com.br/fisica/oscilacoes-ondas-optica-e-radiacao/ondas-fenomenos>, adaptada.

⁵⁰ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-interference. Acesso em 03/02/17.

refração e a reflexão de ondas na água, em ondas sonoras e ondas luminosas, facilitando a percepção desses fenômenos por parte dos estudantes.

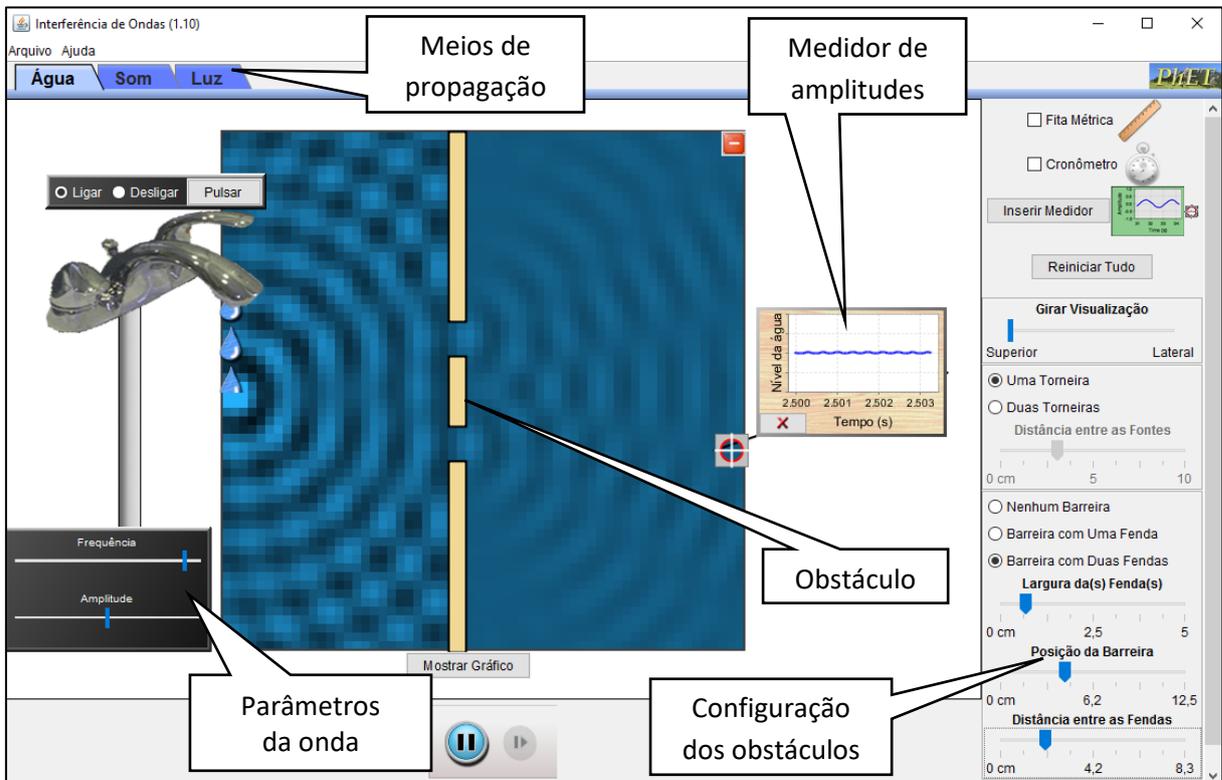


Figura 17: simulação computacional sobre interferência de ondas. FONTE: captura de tela.

- Possibilidades educacionais: a simulação se comporta exatamente como se fosse uma cuba d'água, onde boa parte dos fenômenos ondulatórios podem ser visualizados. Uma barreira pode ser estabelecida para que se perceba a reflexão, assim como um obstáculo com uma fenda pode simular a refração. Estabelecendo um obstáculo com duas fendas, visualiza-se a interferência. Ainda é possível modificar a frequência e amplitude das ondas, bem como os parâmetros dos obstáculos, como largura e distância das fendas e a posição da barreira. Pode-se, também, medir a amplitude das ondas através de um nível. Aqui já se consegue estabelecer uma analogia entre ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas, um dos propósitos deste produto educacional.

- Forma de utilização: a simulação permite, de forma coerente, que se compare os resultados obtidos numa cuba d'água, montada para a aula caso a escola possua o aparato experimental, com os auferidos através de meios computacionais. Desse modo, a simulação transmitirá confiança aos estudantes, que poderão comparar os resultados reais e virtuais, e verificar que ambos se aproximam bastante. Além do mais, os alunos podem perceber a manifestação dos diversos fenômenos ondulatórios estudados na aula, comparando os

resultados experimentais na água, com ondas sonoras e com luz, e perceber que são semelhantes. Por fim, devem entender a importância dos fenômenos no contexto histórico que culminou com o triunfo da teoria ondulatória sobre a teoria corpuscular nas discussões a respeito da natureza da luz entre os séculos XVII e XIX.

DESENVOLVIMENTO

Parte 2 – A predominância da teoria ondulatória

Retomando o contexto histórico analisado, a luz era entendida como uma onda ao final do século XIX porque apresentava todas as propriedades descritas na Parte 1, do mesmo modo que uma onda se comportava na superfície de um líquido. Tal constatação foi obtida pois os dois fenômenos eram análogos.

Entretanto, de acordo com a discussão iniciada no Primeiro Encontro, a teoria ondulatória não era a única que se dispunha a descrever os fenômenos luminosos. A teoria corpuscular, sob a efígie de Newton desde o início do século XVIII, também tentava descrever a luz de maneira coerente com a Mecânica Clássica.

A explicação de Newton para a reflexão da luz era bastante simples. Por entender que a luz era composta de um fluxo de partículas, ele afirmava que a reflexão nada mais era que a colisão elástica dessas partículas com uma superfície, onde o ângulo de incidência era igual ao ângulo de reflexão, situação condizente com sua Mecânica. Já a refração da luz envolvia uma mudança do meio de propagação. No caso analisado na Figura 18, a luz está passando do meio 1, o ar, para o meio 2, um líquido. Como o líquido possui densidade maior (moléculas mais próximas) que o ar, segundo a Mecânica Newtoniana, a luz deve ter sua velocidade aumentada nessa mudança de meio, assim como acontece com o som. Dessa forma, segundo Newton, a velocidade da luz num líquido deveria ser maior do que no ar. Tal ideia, à época, não era passível de constatação científica, uma vez que os meios existentes para a aferição dessas velocidades eram extremamente rudimentares, ficando a teoria em compasso de espera para uma posterior comprovação.

Paralelamente a Newton, Huygens também propunha uma explicação para tais fenômenos, mas baseado na teoria ondulatória. A reflexão era entendida quase que da mesma maneira que a teoria corpuscular. Uma onda se desloca até encontrar um obstáculo que não

pode ser transposto pela mesma. Assim, essa onda é refletida pelo obstáculo, sendo o ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência.

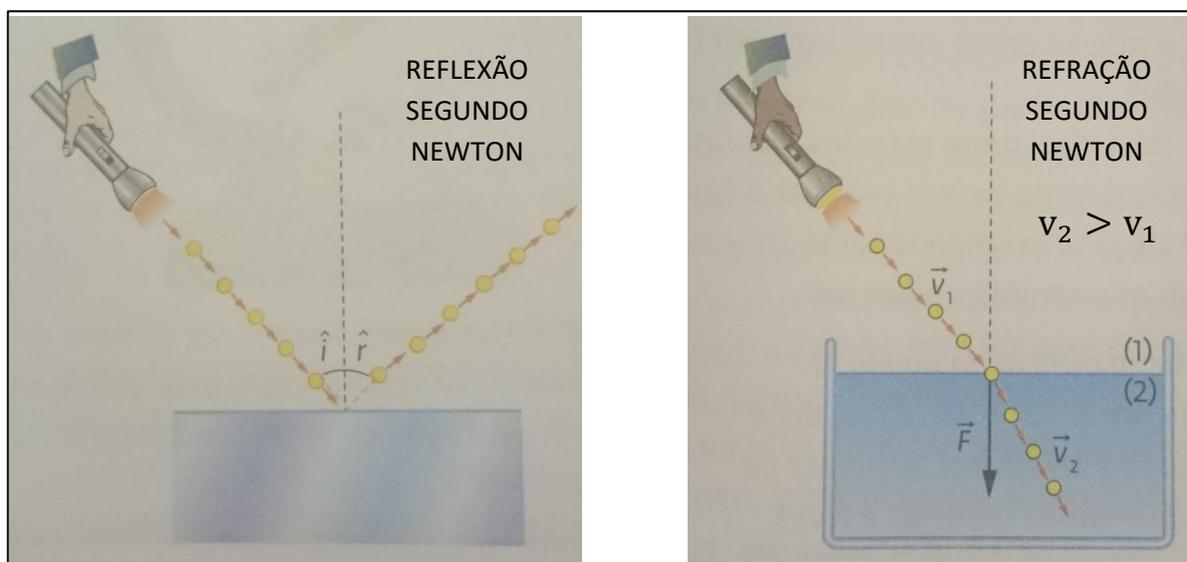


Figura 18: explicação dos fenômenos da reflexão e refração segundo Newton⁵¹.

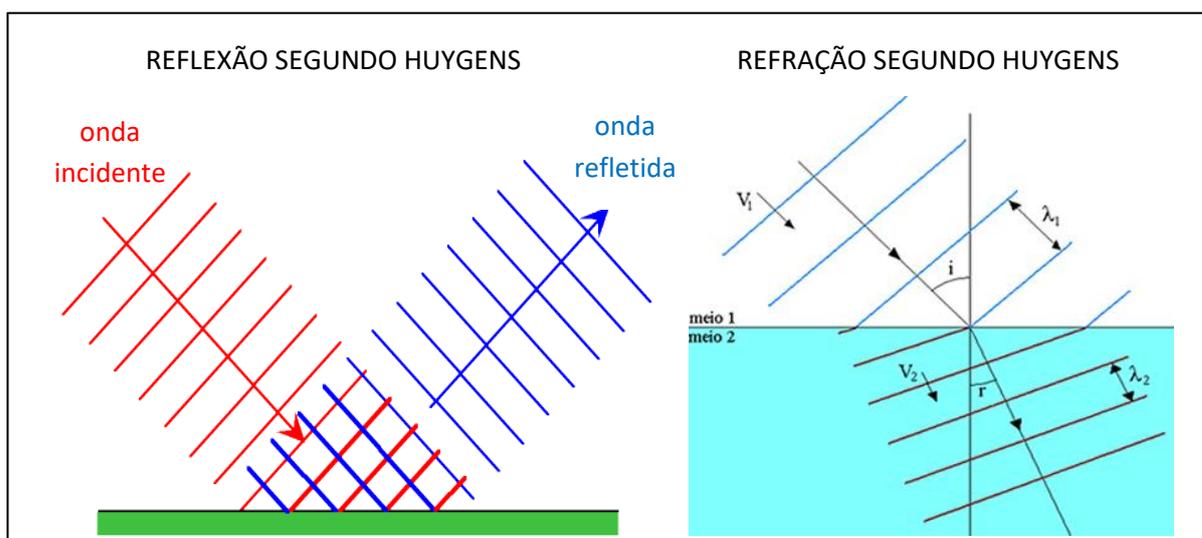


Figura 19: explicação dos fenômenos da reflexão e refração segundo Huygens⁵².

Por outro lado, a explicação para a refração era completamente discordante da teoria corpuscular. Já era sabido, à época, que uma onda, ao passar de um meio menos denso (ar) para um mais denso (líquido), tinha seu comprimento de onda diminuído, como mostra o esquema da Figura 19. A Equação 9 relaciona as grandezas velocidade, comprimento de onda e frequência de uma onda.

⁵¹ Fonte: MÁXIMO e ALVARENGA, p. 230-231, 2014, adaptada.

⁵² Fontes: <http://raiosinfravermelhos.blogspot.com.br/2013/08/reflexao-de-ondas-em-sununga.html> e <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/refracao-ondas.htm>, adaptadas.

$$v = \lambda f \quad [9]$$

Como a frequência é a única grandeza que permanece constante na mudança de meio, e era constatado que o comprimento de onda diminuía, então, pela Equação 10, obrigatoriamente a velocidade também deveria diminuir na mesma proporção, a fim de manter a frequência da onda inalterada.

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad [10]$$

Assim, na explicação do fenômeno da refração, havia uma discordância entre as teorias corpuscular e ondulatória, principalmente quanto à velocidade que a luz adquiria na mudança de meio. Enquanto Newton afirmava que a mesma deveria aumentar, Huygens assegurava que a velocidade deveria diminuir. Como a medição de tal grandeza, com uma precisão mínima, era impossível para a época, as teorias permaneceram em pé de igualdade até o início do século XIX.

Foi quando, em meados de 1800, Thomas Young propôs um experimento que pretendia investigar o comportamento da luz quando submetida a um determinado arranjo. Young fez passar luz solar por um pequeno orifício, e na sequência por outros dois de mesmo tamanho. O resultado dessa experiência foi a formação, num anteparo existente à retaguarda do arranjo experimental, de um padrão conhecido como franjas de interferência. A Figura 20 mostra um esquema da experiência de dupla-fenda de Young.

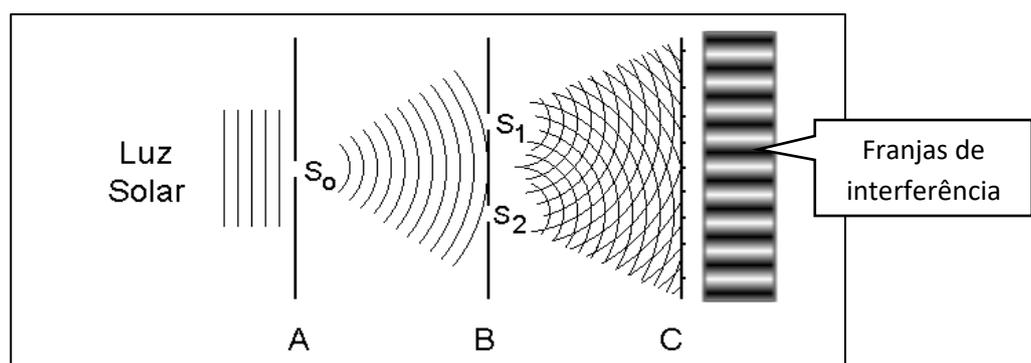


Figura 20: representação esquemática da experiência de dupla-fenda de Young⁵³.

Young percebeu que esse padrão de franjas mostrava a intensidade luminosa em cada ponto do anteparo. Em alguns pontos, a intensidade era máxima (franjas claras), enquanto que em outros era mínima (franjas escuras). Tal padrão de intensidades se verifica também quando

⁵³ Fonte: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fisica-4/lista1.htm>, adaptada.

o experimento é montado utilizando ondas na superfície de um líquido. Com isso, Young propôs que os fenômenos ondulatórios se manifestavam na luz de maneira análoga ao observado na superfície dos líquidos. De fato, pode-se constatar a veracidade dessa afirmação comparando as Figuras 21, que traz uma simulação computacional da versão simplificada do experimento da dupla-fenda, juntamente com um gráfico da distribuição da intensidade luminosa no anteparo, e 22, que traz outra simulação computacional, esta do fenômeno da interferência de ondas formadas na superfície do líquido, junto a medidores do nível da água em determinados pontos do líquido. Pode-se perceber que há uma distribuição dos níveis d'água, ora de grande amplitude, ora de amplitude zero, que se aproxima bastante da distribuição de intensidades luminosas da Figura 21, corroborando a constatação de Young.

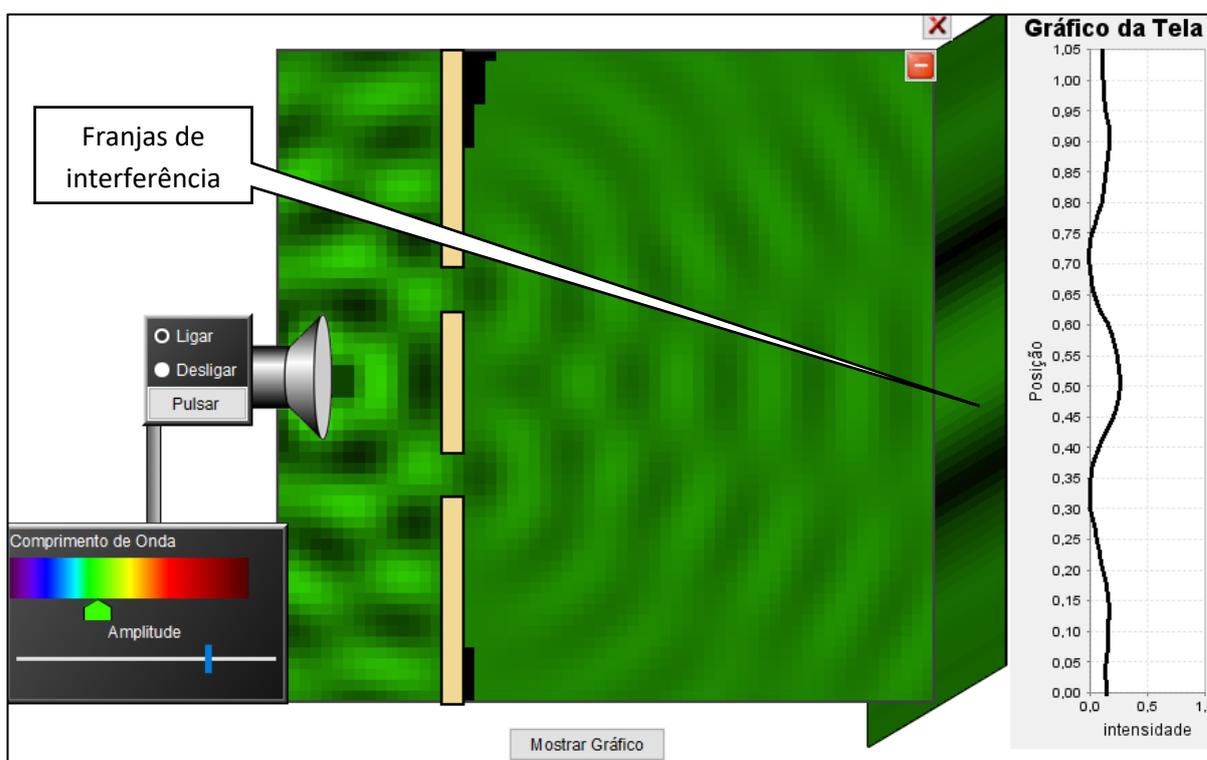


Figura 21: interferência com ondas luminosas, gerada pela Simulação Computacional 3. FONTE: captura de tela.

O trabalho de Young foi fundamental para a consolidação da teoria ondulatória. Como consequência, o modelo corpuscular começou a ser abandonado, pois não conseguiu oferecer uma explicação consistente para os fenômenos da difração e interferência.

No entanto, a prova cabal veio mais de meio século depois. *Jean Foucault*⁵⁴, conseguiu realizar medições consistentes e que não deixaram dúvida de que a luz se movia mais

⁵⁴ Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), físico e astrônomo francês. Reconhecido por seus experimentos que visavam aferir a velocidade da luz, e pelo pêndulo de Foucault, que demonstrou o efeito de rotação da Terra.

rapidamente no ar do que num líquido. Essa prova, fornecida por Foucault, provocou o abandono total da teoria corpuscular, pois mostrou que, com relação à natureza da luz, Newton estava equivocado e o modelo proposto por Huygens era o correto.

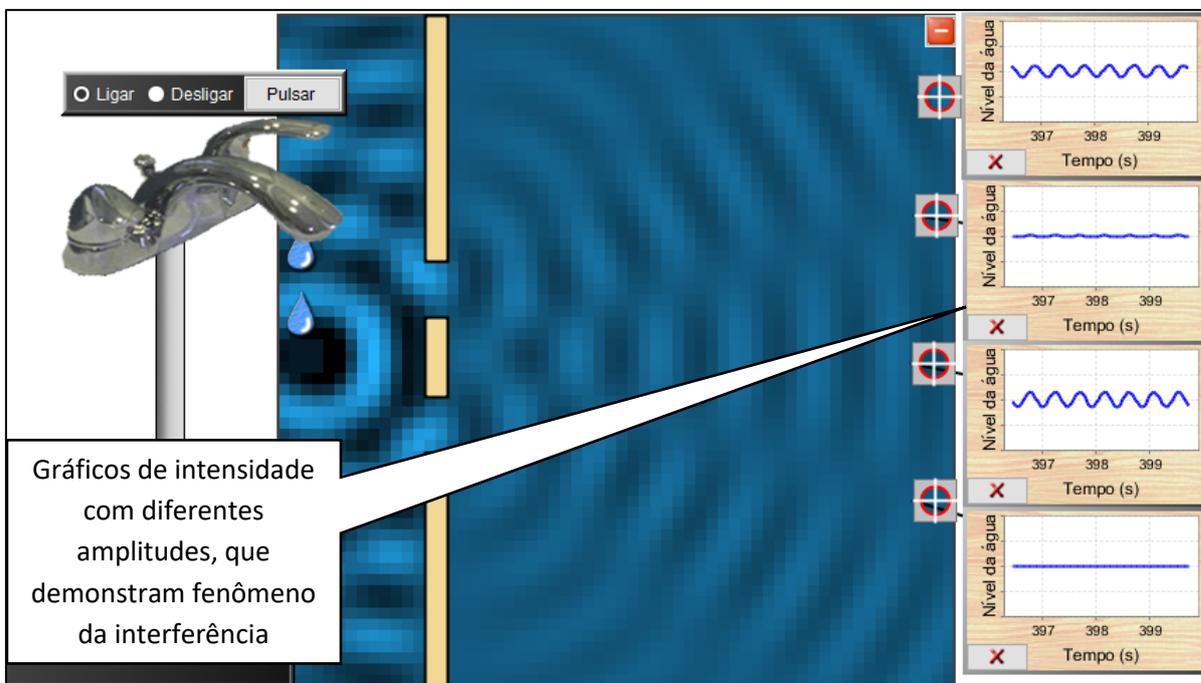


Figura 22: interferência com ondas na água, gerada pela Simulação Computacional 3. FONTE: captura de tela.

DESENVOLVIMENTO

Parte 3 – Einstein e o efeito fotoelétrico

A evidência provida por Foucault encerrou temporariamente uma das maiores discussões da história da Física. Não bastasse isso, a segunda metade do século XIX foi marcada por um destacado desenvolvimento científico, em grande parte catapultado pelo furor da Segunda Revolução Industrial, que se iniciava na mesma época. Com a consolidação da teoria eletromagnética de Maxwell, a Física Clássica era considerada um terreno quase que completamente explorado, sem grandes desafios a serem alcançados. *William Thomson*⁵⁵ chegou a dizer que a Física era um céu azul com duas pequenas nuvens⁵⁶ no horizonte, tamanha era a confiança depositada na teoria clássica.

⁵⁵ William Thomson (1824-1907), físico e matemático britânico. Também conhecido como Lorde Kelvin, desenvolveu a escala absoluta de temperatura, que acabou batizada em sua homenagem.

⁵⁶ As nuvens a que Kelvin se referia eram inconsistências na Física Clássica que acabaram por resultar na teoria da relatividade, de Einstein, e no desenvolvimento da Mecânica Quântica.

Uma dessas nuvens dizia respeito ao espectro de emissão de radiação de um corpo negro, cuja observação experimental não correspondia ao previsto pela teoria clássica. Essa questão foi respondida pela proposta da quantização da energia de Planck. Entretanto, um outro resultado experimental também não estava totalmente de acordo com a teoria clássica. Esse experimento era conhecido como efeito fotoelétrico, observado inicialmente por *Alexandre Becquerel*⁵⁷ em 1839, e confirmado por Hertz, em 1887.

O efeito fotoelétrico consiste, basicamente, na emissão de elétrons por algum material (normalmente um metal) quando sobre este é incidida uma radiação específica. O Eletromagnetismo Clássico previa alguns pontos que não eram observados experimentalmente:

- segundo a teoria clássica, qualquer radiação que incidisse sobre o material deveria ejetar elétrons deste. Na verdade, ocorria que apenas radiações a partir de uma determinada frequência (chamada frequência de corte) conseguiam ejetar elétrons do material. Diferentes materiais possuíam diferentes frequências de corte;
- qualquer metal ejetaria elétrons, desde que os átomos pudessem armazenar uma certa energia da onda incidente para fazê-lo, o que demandaria algum tempo. Maiores intensidades de radiação exigiriam uma menor quantidade de tempo, e vice-versa. No entanto, verificava-se que, quando o material ejetava elétrons, esse processo se dava de modo instantâneo, não dependendo do tempo ou da intensidade da radiação que nele incidia;
- a corrente elétrica estabelecida dependia da intensidade da radiação que incidia na placa. Essa observação era prevista e fazia sentido segundo a teoria clássica.

Em 1905, Einstein, apoiado principalmente na proposta da quantização da energia de Planck (apresentada 5 anos antes), e baseado em estudos paralelos na área, sugere que a radiação também deveria ser quantizada. Ou seja, ela não é mais contínua, mas sim formada de pequenos “pacotes” de energia, que mais tarde foram batizados de *fótons* (símbolo γ). Dessa forma, a radiação não pode mais ser entendida apenas como uma onda. Ela é, segundo Einstein, composta de pequenos corpúsculos, cada um possuidor de uma energia dada pela Equação 11, onde h é a constante de Planck e f é a frequência do fóton. Com isso, a teoria corpuscular, abandonada há quase um século, acaba por ressurgir através da ideia revolucionária de Einstein. Esse, talvez, seja um dos motivos pelos quais sua proposta para a quantização da luz não tenha

⁵⁷ Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891), físico francês. Conduziu estudos introdutórios sobre o efeito fotoelétrico, além de contribuir nos campos da luminescência e fosforescência.

sido aceita de imediato, e que fez Einstein vencedor do Prêmio Nobel de Física apenas 16 anos depois, em 1921.

$$E_\gamma = hf \quad (\text{energia de um fóton}) \quad [11]$$

Além disso, Einstein afirma que, na interação entre fótons e elétrons, um fóton pode interagir apenas com um elétron, na proporção de um para um. O fóton ainda transmite toda sua energia ao elétron, não existindo a possibilidade de repassar apenas parte dela.

Com essas simples ideias, Einstein conseguiu resolver todas as inconsistências apresentadas pela teoria clássica na descrição do efeito fotoelétrico. A existência de uma frequência de corte é justificada pelo fato de cada frequência da radiação incidente corresponder a uma energia bem definida, conforme mostra a Equação 11. Assim, para que ocorra o fenômeno, a energia oferecida pelo fóton durante sua interação com o elétron deve ser maior que a energia que mantém o elétron ligado à rede cristalina. Essa energia de ligação foi chamada de *função trabalho* (ϕ), e é o produto da constante de Planck pela frequência de corte do material, ou seja:

$$\phi = hf_0 \quad (\text{função trabalho}) \quad [12]$$

A questão da existência de um tempo mínimo, necessário para que os átomos pudessem armazenar uma certa energia para ejetarem elétrons, também é refutada por Einstein. Como a absorção da energia do fóton pelo elétron se dá de maneira instantânea, havendo energia suficiente nessa interação, a ejeção do elétron também ocorre instantaneamente.

Baseado no princípio da conservação da energia, Einstein postulou que se a energia transmitida por um fóton for maior que a função trabalho do material, então haverá a ejeção de um elétron, de modo que a diferença entre a energia do fóton e a função trabalho do material equivalerá à energia cinética que o elétron deverá adquirir. Matematicamente, isso equivale a

$$E_\gamma = hf = \phi + E_{cin} \quad [13]$$

onde

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2. \quad [14]$$

A energia cinética de que trata a Equação 14 é a energia cinética máxima que um elétron pode adquirir ao ser ejetado, desde que ele se encontre na camada mais superficial do metal. Elétrons que não estejam na superfície também poderão ser ejetados. Neste caso, demandarão de uma quantidade de energia maior para sua ejeção, adquirindo uma menor energia cinética.

Por fim, de acordo com a teoria proposta por Einstein, a intensidade da radiação está ligada à quantidade de fótons, enquanto que a frequência da radiação se relaciona com a energia desses fótons. Assim, uma maior intensidade da radiação acarreta um acréscimo na corrente elétrica que se estabelece durante o efeito fotoelétrico. Já os elétrons ejetados de um material, submetidos a radiações de diferentes frequências, adquirem maior energia cinética quanto maior for a frequência da radiação incidente.

A fim de gerar uma maior compreensão do efeito fotoelétrico por parte dos alunos, sugere-se que seja apresentada aos mesmos a simulação computacional que trata do fenômeno.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 4

Efeito fotoelétrico⁵⁸

- Descrição sumária: a simulação permite uma completa e ampla visualização do efeito fotoelétrico, experimento que dificilmente é encontrado em laboratórios de escolas de nível médio e fundamental, mas que é largamente empregado em soluções tecnológicas do nosso cotidiano.
- Possibilidades educacionais: a simulação é bastante didática, pois mostra de maneira simples, porém coerente, a interação que ocorre entre a radiação e a matéria. Uma placa metálica é bombardeada com fótons, resultando na ejeção de elétrons, que por sua vez podem ser direcionados por um campo elétrico. Também é possível simular efeitos e diferenças quando se altera a intensidade da radiação e o seu comprimento de onda. Ainda pode-se mudar o material do alvo, escolhendo entre seis metais diferentes. A velocidade dos elétrons pode ser alterada através de um ajuste no potencial do circuito que ora se estabelece. Por fim, são gerados gráficos que ajudam a entender o porquê de haver uma frequência de corte, além de auxiliarem a visualização do comportamento de variáveis como corrente, intensidade e frequência da radiação, entre outros.

⁵⁸ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric. Acesso em 03/02/17.

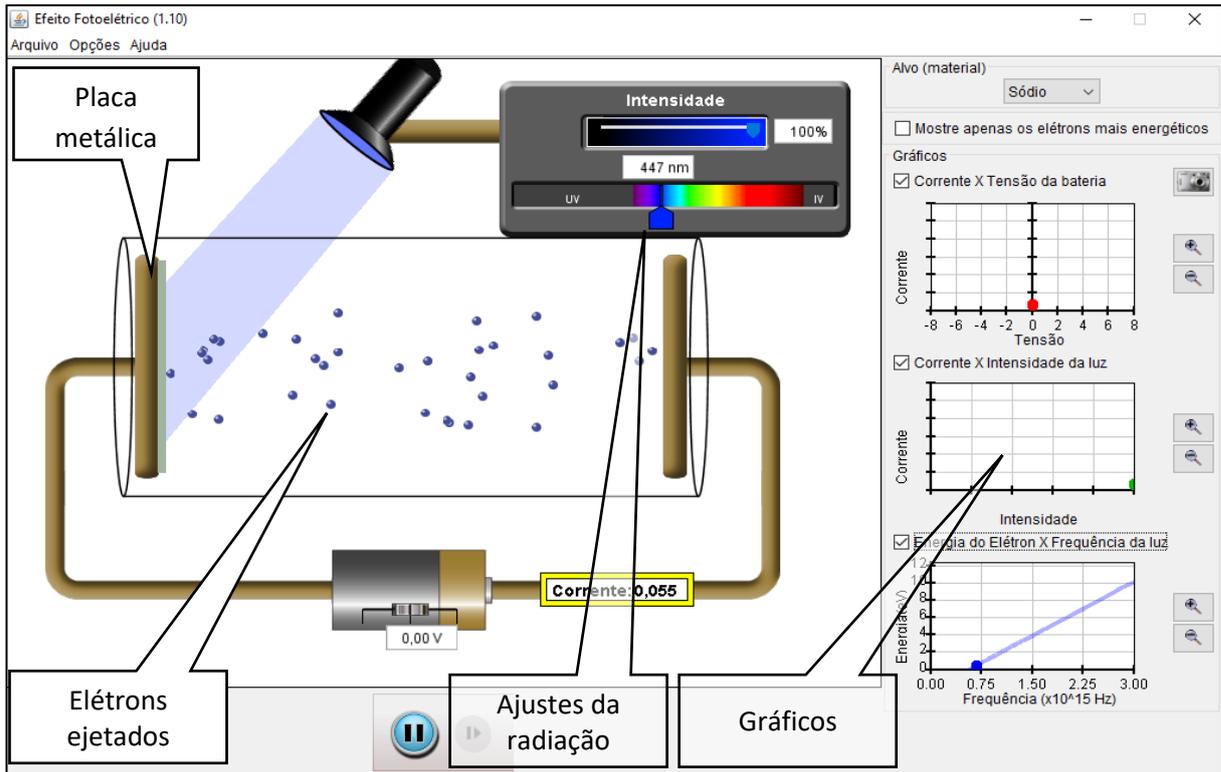


Figura 23: simulação computacional sobre o efeito fotoelétrico. FONTE: captura de tela.

- Forma de utilização: a simulação é considerada fundamental para o entendimento do efeito fotoelétrico por parte dos alunos, principalmente pelo fato de ser extremamente didática. Ela permite que os estudantes possam compreender as falhas da teoria clássica, que tentava descrever o fenômeno. A partir do fracasso da Física Clássica, pode-se trabalhar as ideias propostas por Einstein para a solução do problema, deixando a teoria de quantização da luz bastante clara aos alunos. Como forma de explorar ainda mais os conceitos, sugere-se que os alunos preencham a Tabela 4, que consta do Guia da Aula 2.

Elemento	Função trabalho (ϕ) (eV)	Frequência de corte (f_0) (Hz)	Comprimento de onda (nm)	Faixa do espectro EM
Sódio	2,28	$5,51 \times 10^{14}$	544	Visível
Zinco	4,3	$1,04 \times 10^{15}$	288	UV
Cobre	4,7	$1,14 \times 10^{15}$	263	UV
Platina	6,35	$1,54 \times 10^{15}$	195	UV
Cálcio	2,9	$7,01 \times 10^{14}$	427	Visível
Magnésio	3,68	$8,90 \times 10^{14}$	337	Visível

Tabela 4: função trabalho, frequência de corte e outros parâmetros de diversos metais. As três últimas colunas devem ser preenchidas pelos alunos. FONTE: o autor.

CONCLUSÃO

A luz também é quantizada

Na parte inicial deste encontro entendeu-se, pelos exemplos demonstrados e pela analogia estabelecida, que a luz se comportava como uma onda, motivo pelo qual a teoria ondulatória sobrepujou a corpuscular, e veio a se tornar o modelo adotado para a explicação da natureza da luz a partir do início do século XIX.

No entanto, problemas na teoria eletromagnética clássica, discutidos e analisados ao fim desse mesmo século, forçaram a adoção de um novo entendimento desses problemas, modificando profundamente a visão da Física como um todo. A ideia da quantização da luz proposta por Einstein (baseada na quantização da energia de Planck) só pode ser aceita se a radiação for entendida como composta de pequenos pacotes de energia, os fótons.

Apesar de completamente contraditórias, as duas teorias conseguem descrever, isoladamente e de maneira razoável, o comportamento dos fenômenos luminosos. Assim sendo, a luz deve ser entendida como onda ou partícula? A resposta mais coerente diz que a luz é ora onda, ora partícula, dependendo da maneira como for analisada.

Esse e outros comportamentos estranhos da luz são preditos pela Mecânica Quântica, e serão abordados no próximo encontro.

APÊNDICE 2

Uma nova ordem de grandeza para a energia: o elétron-volt

Como as energias envolvidas nas transições eletrônicas e interações entre fótons e elétrons são extremamente pequenas, houve a necessidade de se criar e adotar uma nova unidade de medida para essas energias. Assim, designou-se o elétron-volt (eV), que por definição é a quantidade de energia cinética ganha por um elétron, quando acelerado no vácuo pela diferença de potencial elétrico de um volt. Em unidades do Sistema Internacional (SI), um elétron-volt corresponde a $1 eV = 1,602 \times 10^{-19} J$.

Alguns exemplos:

- 1) Qual a energia de um fóton de $\lambda = 500 \text{ nm}$?

Um fóton com este comprimento de onda encontra-se na faixa da luz visível do espectro eletromagnético, na transição entre as cores verde e azul. Relacionando a Equação 7, sobre a energia de um fóton, com a Equação 6, onde a velocidade tratada é a da luz, tem-se que

$$E_{\gamma} = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Mas o produto hc é uma constante, e equivale a

$$hc = 1240 \text{ eV nm}$$

Assim, a energia do fóton é

$$E = \frac{1240 \text{ eV nm}}{500 \text{ nm}} = \mathbf{2,48 \text{ eV}}$$

2) Um fóton de $\lambda = 200 \text{ nm}$ consegue produzir o efeito fotoelétrico numa placa de zinco ($\phi = 4,3 \text{ eV}$)? Caso positivo, com que velocidade o elétron é ejetado da placa?

Massa do elétron: $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$$E_{\gamma} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{200 \text{ nm}} = 6,2 \text{ eV}$$

Como a energia do fóton é maior do que a função trabalho do material, o efeito fotoelétrico ocorrerá. A velocidade do elétron ejetado é dada pela diferença entre as energias fornecidas pelo fóton e a função trabalho do material, ou seja

$$\Delta E = E_{\gamma} - \phi = 6,2 \text{ eV} - 4,3 \text{ eV} = 1,9 \text{ eV}.$$

Utilizando a Equação 10, pode-se calcular a velocidade do fóton a partir da energia cinética adquirida pelo mesmo

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2E_{cin}}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,9 \text{ eV} \cdot 1,602 \times 10^{-19} \text{ J/eV}}{9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}}} \cong \mathbf{8,17 \times 10^5 \text{ m/s}}$$

Como a velocidade do elétron ejetado é muito menor que a velocidade da luz, não existe a necessidade de se considerar fatores relativísticos nesse resultado.

Terceiro Encontro: A Mecânica Quântica: principais conceitos e curiosidades

TEMPO SUGERIDO

90 minutos (2 horas-aula)

INTRODUÇÃO

Pequena revisão

No final do século XIX, o panorama da Física se mostrava pouco atrativo quando em comparação a outras áreas do conhecimento, tamanha era a confiança depositada na teoria eletromagnética clássica. Essa teoria descrevia a realidade de modo quase perfeito, não fosse pela falha na explicação do espectro de emissão de um corpo negro. Os resultados experimentais não retratavam a previsão teórica, de modo que essa inconsistência foi denominada catástrofe do ultravioleta, já que a curva teórica da emissividade de um corpo negro tendia ao infinito conforme a frequência da radiação emitida aumentava, como visto no Primeiro Encontro, segundo a Figura 1. Para tentar resolver esse problema, em 1900 Planck propôs uma solução matemática que ajustava a curva teórica aos dados experimentais, sem, no entanto, conseguir explicar exatamente o fenômeno físico que existia por detrás disso. Esse ajuste ficou conhecido como a quantização da energia. Em outras palavras, o corpo negro podia emitir radiação apenas em determinadas frequências (espectro de emissão discreto), e não mais de modo contínuo.

Outro ponto da teoria clássica não esclarecido totalmente era o efeito fotoelétrico, tema abordado no Segundo Encontro. Havia o entendimento apenas parcial do fenômeno. Não se sabia, por exemplo, porque somente radiações com determinadas frequências provocavam a ejeção de elétrons de um material, normalmente um metal. Einstein, inspirado por Planck, consegue responder essas questões em aberto sugerindo um novo modelo para a compreensão do efeito: a luz deveria ser quantizada, assim como ocorria com a energia de um corpo negro. A quantização da luz provocou a formalização de um novo modelo, na qual a radiação não é mais considerada como algo contínuo, mas sim formada por pequenos pacotes de energia, denominadas fótons. A teoria corpuscular, então abandonada há quase um século, ressurgia através do trabalho de Einstein. Entendendo o fóton como uma partícula, segundo ele, bastava que a radiação incidente fosse mais energética que a força de ligação entre os elétrons e o

material (função trabalho) para que ocorresse o efeito fotoelétrico. Se essa condição fosse satisfeita, o elétron era ejetado com uma energia cinética igual à diferença entre as energias de ligação e do fóton incidente.

Esses fatos surgiam, no início do século XX, como indícios de que a natureza da luz era diferente daquilo que se pensava até então, e esses indícios começaram a se avolumar. Entretanto, as ideias revolucionárias apresentadas por Planck e Einstein não agradaram, de imediato, a comunidade científica da época. Pelo contrário. Diversos físicos passaram a concentrar seus esforços em tentativas de refutar tais teorias que, apesar de aparentarem estar corretas sob o ponto de vista dos pressupostos básicos de Planck e Einstein, iam na contramão da concepção geral da Física da época. Outra parcela de pesquisadores se mostrou sensível aos novos conceitos, e da mesma maneira, se debruçaram sobre essas ideias na tentativa de comprová-las. Em ambos os casos, seja para refutação ou comprovação, a prova cabal viria apenas pela via experimental, uma vez que, como mencionado, as novas teorias não apresentavam erros conceituais aparentes.

DESENVOLVIMENTO

Parte 1 – A luz como partícula

O primeiro grande ponto de divergência remeteu à antiga discussão sobre qual teoria descrevia corretamente a luz e a radiação como um todo. Em determinado momento, a luz se comportava como onda. Logo a seguir, se manifestava como partícula, dependendo da forma como era interpretada ou medida. Esse comportamento estranho da radiação passou a ser conhecido como *dualidade onda-partícula*. A escolha dessa nomenclatura se deu pelo fato de que nenhuma das duas teorias, ondulatória e corpuscular, conseguia explicar a radiação de forma completa. Assim, entendeu-se naquele momento que a luz se comportava de maneira dual, e necessitava de uma explicação mais ampla, que abarcasse todas as suas facetas.

Em 1916, Einstein propôs que um fóton deveria possuir momentum linear. Ele baseou-se na equação que determina a energia total de uma partícula, fruto de um de seus trabalhos apresentados em 1905, a mais tarde denominada *Teoria da Relatividade Restrita*.

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2. \quad [15]$$

A Equação 15 diz que a energia total de uma partícula é a soma das parcelas do momentum linear (pc) e da energia de repouso (mc^2) dessa partícula, onde p e m referem-se, respectivamente, ao momentum linear e à *massa de repouso* da partícula. Quando aplicada a um fóton, cuja massa de repouso é zero, a Equação 15 se reduz a

$$E = pc. \quad [16]$$

Mas a energia de um fóton é dada pelo produto hf (Equação 11). Assim, reorganizando as equações 11 e 16, e combinando com a Equação 10, onde a velocidade envolvida é a da luz, tem-se a equação do módulo do momentum de um fóton:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad [17]$$

Coube a *Arthur Compton*⁵⁹, em 1923, apresentar um experimento baseado no fenômeno de difração de raios X, que comprovaria que o fóton possui momentum linear. O resultado desse experimento ficou conhecido como efeito Compton. O experimento consistia, basicamente, em bombardear um alvo de grafite com raios X produzidos por uma fonte, e observar como se dava o espalhamento dessa radiação segundo alguma direção. A Figura 24 mostra um esquema do experimento de Compton.

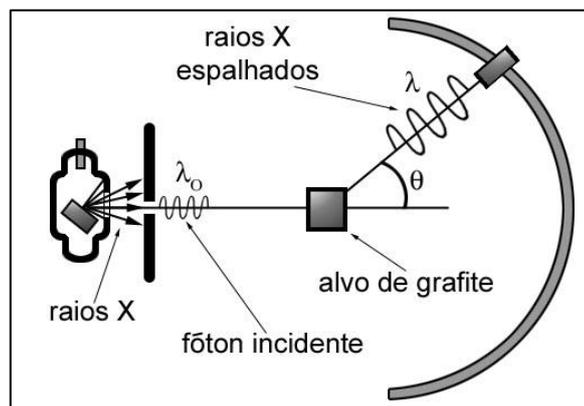


Figura 24: representação esquemática da experiência de espalhamento de raios X de Compton⁶⁰.

Do ponto de vista clássico, a explicação para o espalhamento de raios X não é algo complicado de se entender. Sob a perspectiva da luz como onda, os elétrons que compõem a

⁵⁹ Arthur Holly Compton (1892-1962), físico norte-americano. Participou ativamente do desenvolvimento da Mecânica Quântica, particularmente no estudo da interação entre radiação e matéria, o que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1927.

⁶⁰ Fonte: http://www.fisicapaidegua.com/conteudo/conteudo.php?id_top=060103, adaptada.

matéria atingida por algum campo eletromagnético (nesse caso, os raios X) entram em movimento oscilatório de frequência igual ao do campo incidente, passando a atuar como emissores de radiação, naquela frequência. Assim, sob esse aspecto, as frequências – e os comprimentos de onda – das radiações incidente e espalhada seriam iguais. No entanto, não foi isso que Compton observou. Ele percebeu que posicionando o sensor em diferentes direções, conforme se aumentava o ângulo do espalhamento, começavam a aparecer picos da radiação espalhada, detectados pelo sensor, com comprimentos de onda diferentes do feixe incidente. A Figura 25 mostra alguns resultados experimentais obtidos por Compton, para diferentes ângulos de espalhamento. Pode-se perceber que, conforme o ângulo de espalhamento aumenta, a diferença entre os picos $\Delta\lambda$ também aumenta.

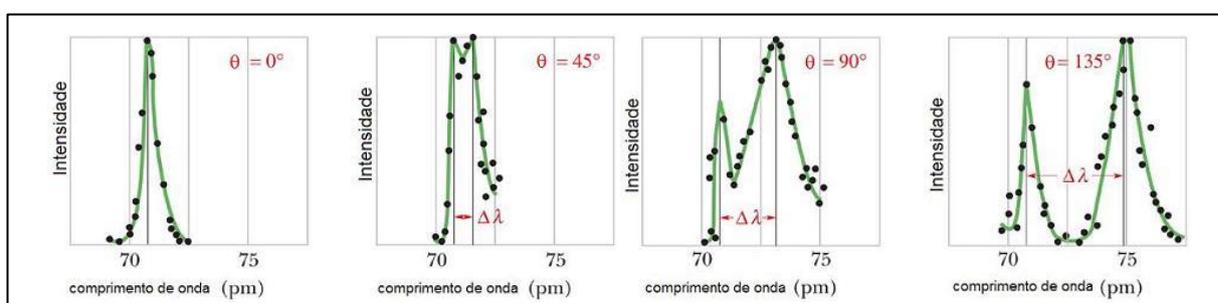


Figura 25: resultados experimentais obtidos por Compton para diferentes ângulos de espalhamento⁶¹.

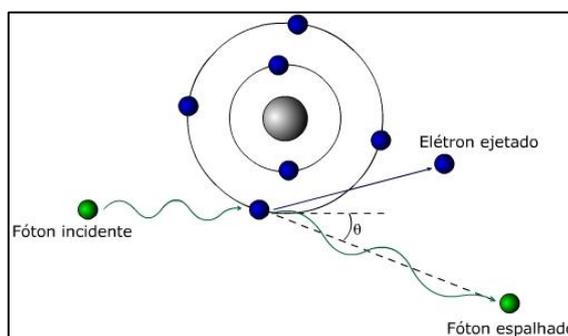


Figura 26: representação da interação entre um fóton e um elétron⁶².

Compton interpretou o aparecimento desse outro pico de radiação, de comprimento de onda maior que a radiação incidente, como a transferência de energia e momentum de um fóton de raio X para um elétron estacionário do alvo de carbono. Essa transferência de energia pode ser entendida como tendo ocorrido devido a uma *colisão* do fóton com o elétron, corroborando a ideia de Einstein, e em último caso a teoria corpuscular, onde os princípios físicos da conservação da energia e do momentum linear são respeitados. A Figura 26 exemplifica a forma

⁶¹ Fonte: HALLIDAY, RESNICK e WALKER, p. 192, 2009.

⁶² Fonte: <http://efeitofotoeletricoecompton.webnode.com.br/efeito-compton>.

de como se dá a interação entre fóton e elétron, onde ocorre o espalhamento do primeiro e a ejeção do último.

Importa aqui ressaltar que o fato de o fóton transferir apenas parte de sua energia e momentum linear ao elétron não depõe contra os pressupostos básicos de Einstein para a explicação do efeito fotoelétrico, já que o fóton tem sua frequência – e, conseqüentemente, sua energia – diminuída nessa interação. Segundo Einstein, o fóton só pode transmitir sua energia ao elétron de maneira completa, e não apenas parte dela. O que ocorre, na verdade é uma cadeia de eventos muito mais complexa, que foi descrita apenas três décadas mais tarde por *Richard Feynman*⁶³, conhecida por Teoria Quântica de Campos, um ramo da Eletrodinâmica Quântica. Feynman criou um diagrama para representar a interação entre as partículas. Pode-se entender, resumidamente, que um elétron, ao interagir com um fóton, recebe toda a energia deste e, em seguida, libera parte dessa energia na forma de outro fóton, de frequência menor que seu antecessor. Assim, pelos princípios da conservação da energia e do momentum linear, a diferença de energia entre o fóton incidente e o formado na interação é exatamente igual à energia cinética adquirida pelo elétron após a interação. A Figura 27 mostra um Diagrama de Feynman referente ao processo acima descrito.

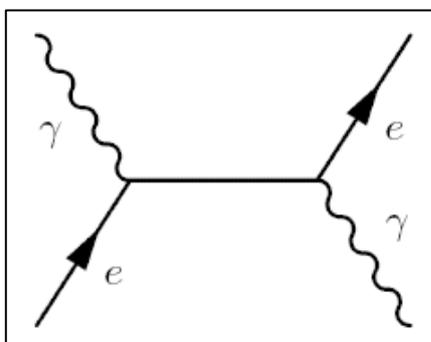


Figura 27: Diagrama de Feynman para a interação entre um fóton e um elétron⁶⁴.

Por outro lado, *Robert Millikan*⁶⁵ não aceitava a ideia da luz como partícula proposta por Einstein, e dedicou boa parte de sua vida tentando provar que ele estava errado a respeito de sua explicação para o efeito fotoelétrico. Millikan tentou, por anos a fio, demonstrar

⁶³ Richard Philips Feynman (1918-1988), físico e professor norte-americano. Contribuiu com diversos estudos sobre a Mecânica Quântica, tendo destaque na formulação da Eletrodinâmica Quântica, trabalho este que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1965.

⁶⁴ Fonte: <http://www.astropt.org/2011/06/09/introducao-aos-diagramas-de-feynman-e-a-fisica-de-particulas>.

⁶⁵ Robert Andrews Millikan (1868-1953), físico norte-americano. Mediu a relação carga-massa do elétron. Recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1923 por esse estudo e por contribuições que comprovaram a teoria de Einstein sobre o Efeito Fotoelétrico.

experimentalmente que Einstein estava equivocado, sem, no entanto, obter sucesso. O que ele conseguiu, na verdade, foi comprovar a teoria de Einstein, uma vez que não logrou êxito na tentativa de refutar tais ideias.

DESENVOLVIMENTO

Parte 2 – A partícula como onda

Um ano depois da comprovação de que a luz podia se comportar como partícula, um jovem físico francês chamado *Louis de Broglie*⁶⁶ propôs, em sua tese de doutorado, que poderia haver uma similaridade entre a matéria e a radiação. De Broglie postulou que, se era verdade que fótons se comportavam como partículas, então um feixe de partículas também poderia apresentar propriedades ondulatórias, teoria que mais tarde ficou conhecida como *ondas de matéria*. Sua tese baseou-se nessa ideia, cuja expressão matemática oriunda de uma manipulação algébrica da Equação 17. A Equação 18 apresenta o comprimento de onda de de Broglie a uma partícula qualquer de momentum linear p .

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad [18]$$

De acordo com a Equação 18, ao associar um comprimento de onda a uma partícula, fica evidente que apenas partículas com momentum linear com ordem de grandeza próxima à constante de Planck apresentarão propriedades ondulatórias mensuráveis. O Apêndice 3, ao final deste encontro, traz exemplos de partículas, moléculas e corpos rígidos com seus comprimentos de onda de de Broglie associados.

A confirmação da veracidade da teoria de de Broglie ocorreu três anos mais tarde, em 1927, através de um experimento sobre a difração de elétrons, conduzido separadamente por *Clinton Davisson*⁶⁷ e *Lester Germer*⁶⁸, dos *Bell Telephone Laboratories*, e por *George*

⁶⁶ Louis-Victor-Pierre-Raymond, 7º Duque de Broglie (1892-1987), físico francês. Teve grande contribuição no desenvolvimento da teoria quântica. Por sua teoria sobre as ondas de matéria, recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1929.

⁶⁷ Clinton Joseph Davisson (1881-1958), físico norte-americano. Entre outros trabalhos, corroborou a teoria das ondas de matéria através do experimento de difração de elétrons, e por isso recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1937.

⁶⁸ Lester Germer (1896-1971), físico norte-americano. Auxiliou Clinton Davisson no experimento de difração de elétrons. Apesar do experimento levar seu nome, não foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física de 1937.

Thomson⁶⁹, da Universidade de Aberdeen, na Escócia. O experimento que estudava o fenômeno da difração de elétrons ficou conhecido como experimento de Davisson-Germer, e era bastante semelhante ao da difração de raios X, de Compton. Ele consistia, basicamente, em fazer incidir sobre uma rede cristalina qualquer um feixe de elétrons com momentum linear tal que fosse possível verificar um padrão de interferência. A interferência surge porque, se os elétrons possuem comportamento ondulatório, então os átomos das várias camadas da rede cristalina de um material podem servir como barreira a essa onda de matéria, já que o comprimento de onda do feixe de elétrons incidente possui uma ordem de grandeza próxima à da distância de separação das camadas atômicas da rede cristalina. A Figura 28 mostra o esquema de uma rede cristalina, onde dois feixes de elétrons percorrem caminhos diferentes a acabam por interferir entre si, formando uma figura de interferência, não mostrada na imagem.

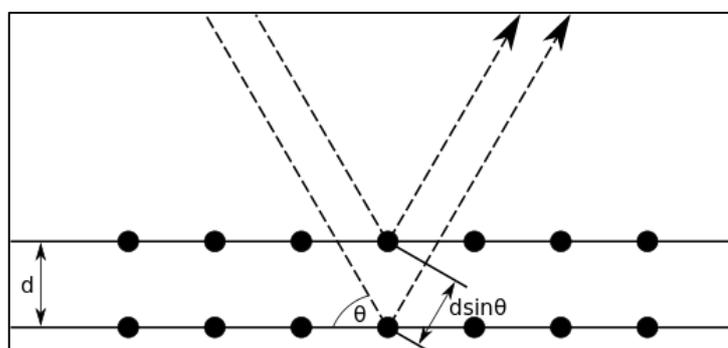


Figura 28: representação esquemática do fenômeno da difração de elétrons⁷⁰.

A fim de melhor demonstrar o fenômeno e facilitar o entendimento do mesmo por parte dos estudantes, sugere-se que aqui seja exposta aos mesmos uma simulação computacional sobre o fenômeno da difração de elétrons.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 5

Experimento de Davisson-Germer⁷¹

- Descrição sumária: a simulação auxilia o entendimento do experimento conduzido por Davisson e Germer, e posteriormente por Thompson, sobre a difração de

⁶⁹ George Paget Thomson (1892-1975), físico britânico. Paralelamente a Clinton Davisson, comprovou a teoria das ondas de matéria através do experimento de difração de elétrons, e por isso recebeu, junto a Davisson, o Prêmio Nobel de Física de 1937.

⁷⁰ Fonte: http://www.wikiwand.com/pt/Lei_de_Bragg.

⁷¹ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/davisson-germer. Acesso em 03/02/17.

elétrons, cujo objetivo era testar a hipótese levantada por de Broglie a respeito do comportamento ondulatório da matéria, além de simular o fenômeno da difração de elétrons.

- Possibilidades educacionais: no intuito de internalizar o conceito da dualidade onda-partícula na estrutura cognitiva dos alunos, a simulação é uma excelente ferramenta de apoio, pois seu resultado demonstra de forma cabal que o conceito estudado é algo real, a despeito da desconfiança de boa parte dos alunos. A simulação consiste na emissão de um feixe de elétrons, direcionado a fim de colidir com a rede cristalina de um material qualquer. Os elétrons espalhados podem se combinar de tal maneira que o resultado será uma figura de interferência, o que caracteriza o comportamento ondulatório da matéria. Essa figura pode ser conseguida ajustando-se os parâmetros do raio e separação atômica, além da velocidade e da quantidade de elétrons do feixe incidente.

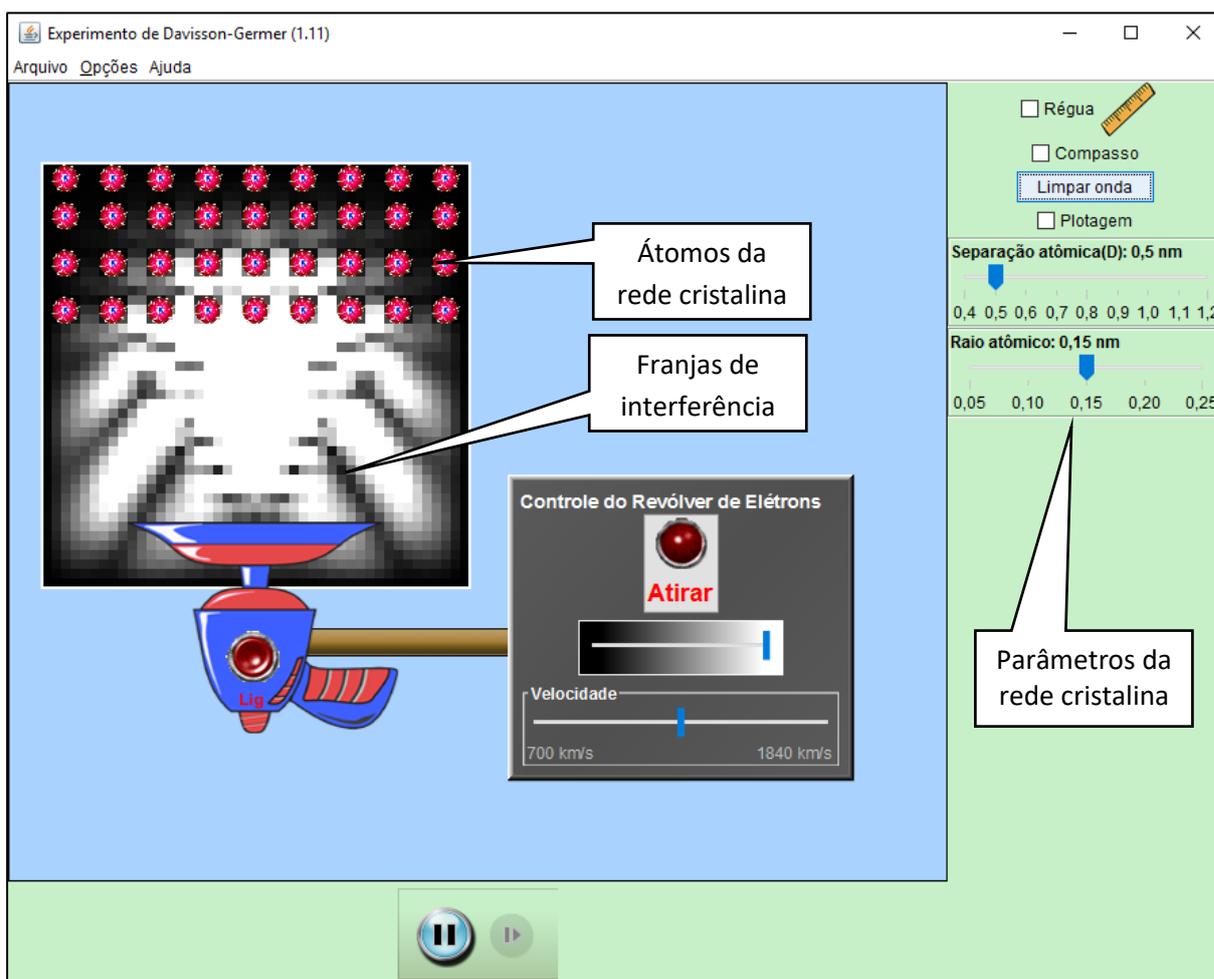


Figura 29: simulação computacional sobre o experimento de Davisson-Germer. FONTE: captura de tela.

- Forma de utilização: a simulação tenta convencer os estudantes a respeito da natureza ondulatória da matéria, ideia completamente nova para a grande maioria. Também é

mais uma prova de que a teoria quântica, quase como um todo, foi inicialmente formulada com base em evidências indiretas, e depois comprovada através de experimentos mais específicos, indo na contramão do pensamento científico que orientava a Física Clássica, historicamente.

Como forma de evidenciar a dualidade onda-partícula, sugere-se a utilização de uma simulação computacional que demonstra o caráter ondulatório de fótons e partículas. A simulação sugerida, denominada *interferência quântica*, possui diversos recursos que serão explorados em outra oportunidade no decorrer desta proposta educacional. Recomenda-se, aqui, que seja procedida apenas uma demonstração na opção *Alta intensidade*, com um obstáculo do tipo dupla-fenda, para partículas do tipo fótons e elétrons. Uma descrição sumária das diversas possibilidades da simulação é procedida a seguir.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 6

Experimento de interferência quântica⁷²

- Descrição sumária: a simulação permite que sejam verificados fenômenos ondulatórios e corpusculares sobre partículas, tanto sob a perspectiva clássica quanto sob a quântica, dependendo do modo como se encare o experimento. Permite, também, simular a emissão de uma única partícula por vez para a verificação dos fenômenos quânticos.

- Possibilidades educacionais: a simulação tem por finalidade permitir a verificação de todos os princípios básicos que regem a Mecânica Quântica, pois admite, entre outros arranjos, a emissão de uma única partícula a cada vez, num experimento do tipo dupla-fenda. Poucos laboratórios no mundo possuem essa capacidade de manipulação, daí a importância da simulação. Além disso, ainda possibilita a percepção dos fenômenos quânticos na configuração de várias partículas simultâneas, a exemplo da borracha quântica. Pode-se ainda trabalhar com diferentes partículas, como fótons, elétrons, nêutrons ou átomos de hélio, e verificar as semelhanças e diferenças. Os obstáculos disponíveis podem ser do tipo dupla-fenda ou barreira de potencial, havendo ampla possibilidade de configuração de seus parâmetros. No caso da dupla-fenda, pode-se instalar detectores nas mesmas, a fim de entender o que acontece quando se tenta medir a onda. A simulação ainda permite que se copie a tela do anteparo, de forma a comparar como as ondas de matéria vão se formando com o decorrer do

⁷² Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference. Acesso em 03/02/17.

tempo, no caso da emissão de uma única partícula por vez, como mostrado na Figura 31. Nela, pode-se perceber a formação das franjas de interferência nos seis primeiros quadros, obtidos em intervalos regulares com a simulação, seguida da comparação com o padrão esperado ao longo do tempo, constante do último quadro.

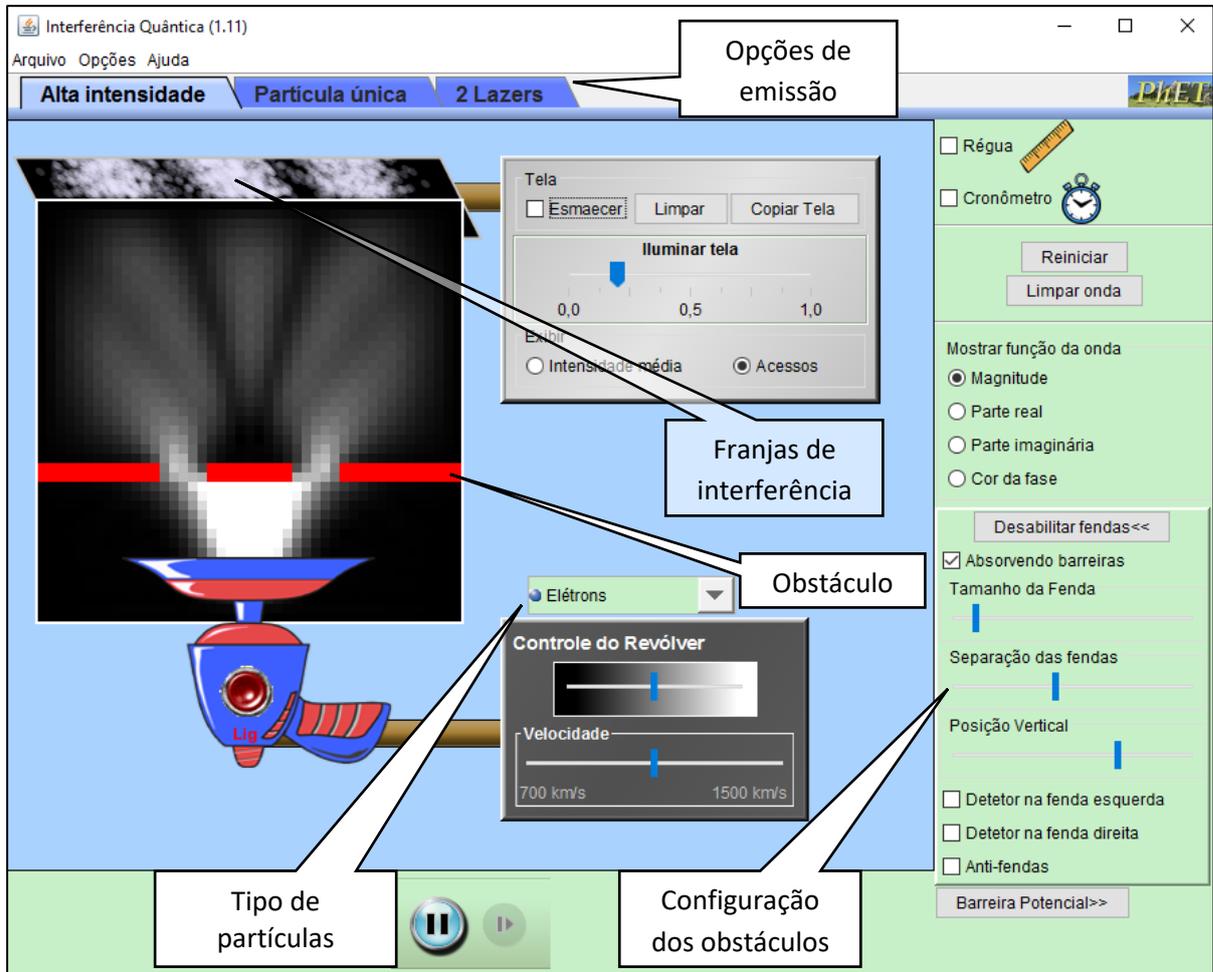


Figura 30: simulação computacional sobre o experimento de interferência quântica. FONTE: captura de tela.

- Forma de utilização: a simulação sobre a interferência quântica será a mais utilizada durante o curso. Ela será apresentada pela primeira vez no terceiro encontro, após ser tratado o conceito das ondas de matéria. Como forma de convencer os alunos daquilo que se está tentando ensinar, a simulação será utilizada para demonstrar o caráter ondulatório da matéria, utilizando fótons e elétrons numa configuração do tipo dupla-fenda. O aparecimento de franjas de interferência no anteparo demonstrará a natureza ondulatória das partículas, sem que se seja necessário abordar mais profundamente os detalhes quânticos, o que ocorrerá futuramente. A simulação será apresentada novamente ao início do quarto encontro, quando os alunos terão o primeiro contato com os princípios fundamentais da Mecânica Quântica. Aqui, dever-se-á exemplificar cada um dos princípios, sob a perspectiva do experimento da dupla-

fenda com partículas (fótons e elétrons). Os alunos poderão visualizar o aparecimento das franjas de interferência, quando se tratar o problema sob o ponto de vista de onda, e o desaparecimento deste padrão, quando da interpretação do fenômeno como partícula. Esse fato, que materializa os princípios tratados, poderá causar espanto e perplexidade aos alunos, que podem estar reticentes em aceitar todos aqueles conceitos estranhos que serão tratados. Por fim, no intuito de massificar ainda mais aqueles novos conhecimentos na estrutura cognitiva dos alunos, opta-se por apresentar novamente a simulação no decorrer do quarto encontro, após a discussão do experimento mental do gato de Schrödinger, e logo antes da exposição do experimento da borracha quântica, oportunidade em que serão novamente discutidos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica, de maneira cada vez mais aprofundada.

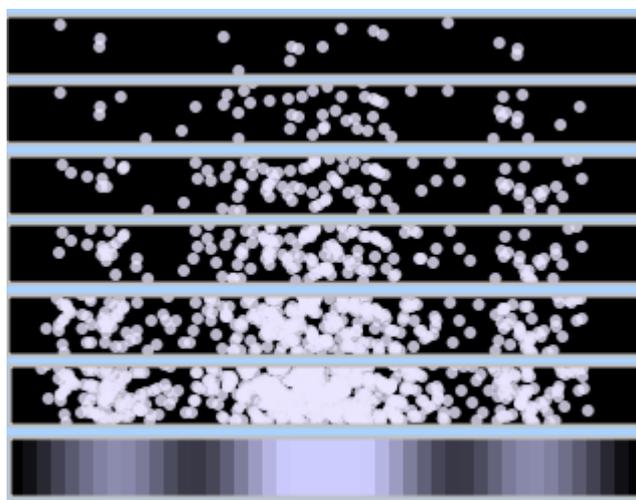


Figura 31: formação das ondas de matéria no anteparo, gerada pela Simulação Computacional 6. FONTE: captura de tela.

DESENVOLVIMENTO

Parte 3 – O princípio da incerteza

Não bastasse a estranheza da dualidade onda-partícula, onde a radiação e a matéria podem se comportar de maneiras diferentes, começou-se a verificar que as leis físicas que regem os corpos extensos não fariam sentido quando aplicadas a partículas subatômicas, átomos e até mesmo moléculas. Para se obter informações a respeito de um sistema físico é necessário realizar a medição de alguma grandeza física desse sistema. Essa medição se dá, basicamente, através da interação entre fótons e a matéria. Em corpos extensos, isso não chega a ser um problema. Entretanto, como visto na discussão da dualidade, quando se está tentando obter informações sobre partículas, a interação destas com os fótons acaba por interferir no

próprio sistema, trazendo uma considerável incerteza a respeito da grandeza medida. Baseado nesses pressupostos, em 1927, *Werner Heisenberg*⁷³ formulou uma constatação perturbadora a respeito da Mecânica Quântica, que viria a ser conhecida como princípio da incerteza (ou da indeterminação) de Heisenberg. A grosso modo, essa formulação expunha não ser possível, ao mesmo tempo, conhecer com precisão a posição e o momentum linear de uma partícula quântica. Em outras palavras, quanto mais se quisesse determinar com exatidão a posição de uma partícula, maior seria a incerteza a respeito de sua velocidade, e vice-versa. Pode-se entender o princípio da incerteza através de argumentos quânticos ou semiclássicos. Uma explicação semiclássica é aquela que leva em conta aspectos clássicos para o entendimento de conceitos quânticos.

Quanticamente, o princípio da incerteza é explicado porque a medição de uma partícula quântica depende da interação dela com algum instrumento de medida, como uma radiação, por exemplo. Para determinar a posição de um elétron precisa-se que um fóton dessa radiação tenha um comprimento de onda da mesma ordem de grandeza da incerteza com que se deseja determinar a posição. Assim, quanto menor o comprimento de onda, maior será a precisão da medida. Mas, de acordo com a Equação 11 quanto menor o comprimento de onda, maior será a energia associada ao fóton. Logo, a interação entre o fóton, com considerável momentum linear, e o elétron, resultará numa grande imprecisão no momentum linear do elétron, apesar de se ter uma boa aproximação quanto à sua posição. A Figura 32 representa tal idealização.

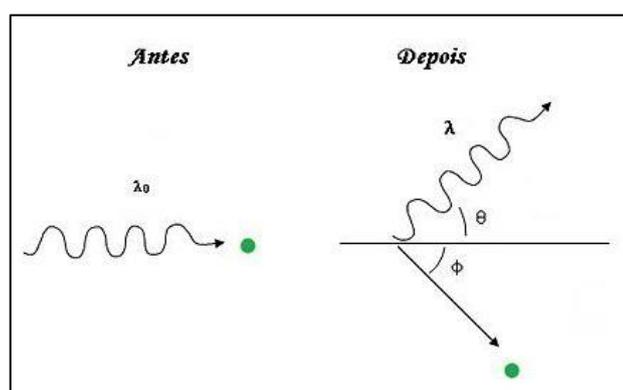


Figura 32: representação da interação entre um fóton e um elétron⁷⁴.

A explicação semiclássica leva em consideração argumentos quânticos e clássicos para a descrição do princípio da incerteza. Estabelecendo uma analogia para a situação, é como se

⁷³ Werner Karl Heisenberg (1901-1976), físico alemão. Um dos principais responsáveis pela formulação da teoria quântica, trabalho pelo qual recebeu, como reconhecimento, o Prêmio Nobel de Física de 1932.

⁷⁴ Fonte: http://www.wikiwand.com/pt/Lei_de_Bragg.

pretendesse medir a posição de uma bola de basquete jogando sobre ela uma bola de futebol. Até se poderia afirmar algo sobre a posição da bola de basquete verificando o local da colisão, mas as informações com relação à velocidade da mesma não teriam grande precisão.

Matematicamente, o princípio da incerteza é representado por uma desigualdade, onde o produto das incertezas sobre a posição e o momentum linear deve ser maior ou igual à constante de Planck normalizada:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \text{ onde } \hbar = \frac{h}{2\pi} \quad [19]$$

Do trabalho de Heisenberg surgiram várias implicações teóricas que divergiam completamente da Mecânica Clássica. Uma delas nasce da análise da Equação 19. É impossível reduzir a zero a imprecisão da posição ou do momentum linear de uma partícula quântica – ou seja, obter uma precisão total a respeito de qualquer dessas grandezas – já que o produto dessas duas grandezas deve possuir um valor mínimo. Assim sendo, essa partícula sempre terá uma incerteza associada à sua velocidade, o que significa afirmar que ela nunca poderá estar parada. Isso é completamente inconcebível à Mecânica Clássica. Outra implicação parte da hipótese anterior. Se a partícula sempre possui um momentum linear associado, então sempre haverá uma parcela de energia cinética associada à partícula, a chamada *energia do ponto zero*, a mínima energia que uma partícula (ou sistema) pode ter. Isso significa dizer que, por mais que se tente reduzir a energia de uma partícula quântica, ela nunca será nula.

Um bom sistema físico idealizado, que exemplifica tais implicações do princípio da incerteza, é o chamado *poço quântico*, também conhecido como confinamento ou curral quântico. Apesar de envolver conceitos muito mais profundos, e servir de exemplo para vários temas da Mecânica Quântica, um poço quântico nada mais é do que uma região qualquer do espaço, delimitada por uma barreira de energia potencial. Estabelecendo outra analogia entre o mundo clássico e o quântico, a água em uma piscina é uma boa maneira de se entender o citado sistema físico. A água pode ser comparada às partículas quânticas quando está confinada pelas paredes da piscina, que funcionam como uma barreira de energia potencial gravitacional. Ou seja, não há como a água sair da piscina, a não ser que lhe seja fornecida uma quantidade de energia suficiente para que possa vencer o confinamento na qual se encontra. Voltando ao mundo quântico, a Figura 33 traz o esquema de um poço quântico de potencial infinito, de largura L , contendo uma partícula quântica qualquer (não representada na figura), onde o potencial (V) é infinito em qualquer região do espaço fora do poço, que por sua vez tem

potencial zero em seu interior. Isso significa dizer que a partícula só pode existir dentro da região do confinamento, e não fora dele.

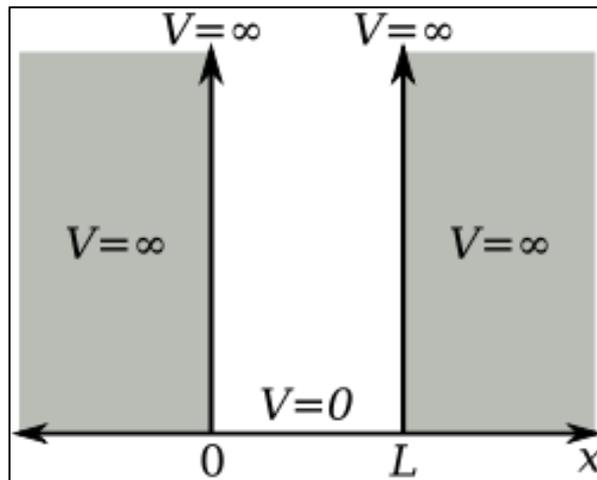


Figura 33: representação de um poço quântico de potencial infinito, de largura L ⁷⁵.

Partir-se-á do pressuposto que a largura L do poço possa ser ajustável. O que acontece ao se tentar diminuir sua largura? Ora, uma diminuição da largura do poço significa que está se tentando conseguir uma informação mais precisa a respeito da posição da partícula, ou seja, se está diminuindo a incerteza quanto à sua posição. Segundo o princípio da incerteza, o produto $\Delta x \cdot \Delta p$ deve possuir um valor mínimo diferente de zero, o que significa dizer que uma diminuição da incerteza associada à posição acarretará um aumento na incerteza acerca do momentum linear, aumentando a velocidade e, conseqüentemente, a energia da partícula. Se a largura do poço fosse diminuída a zero, a incerteza quanto à posição também seria zero, e a incerteza quanto ao momentum linear seria infinita, gerando uma energia infinita, o que não é possível, quântica ou classicamente. Por outro lado, se a largura do poço for aumentada, a velocidade da partícula irá diminuir, assim como a incerteza a ela associada, o que ocasionará um aumento na incerteza quanto à posição da mesma.

Uma outra implicação, mais ampla e associada a outras ideias que surgiam a respeito da Mecânica Quântica, foi a necessidade da adoção de um novo modelo atômico. À época, o modelo de Bohr (órbitas estacionárias) era considerado o mais atual, apesar de não descrever completamente o átomo. As contribuições de de Broglie e Heisenberg foram fundamentais para o novo entendimento do modelo atômico.

Aqui, mais uma vez, se sugere a adoção de uma simulação computacional para a discussão e exemplificação do modelo atômico.

⁷⁵ Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_em_uma_caixa.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 7

Modelos do átomo de hidrogênio⁷⁶

- Descrição sumária: a simulação consiste basicamente na representação de um átomo de hidrogênio, iluminado por luz branca ou monocromática. A partir daí, pode-se realizar uma comparação do resultado experimental desse processo com as diversas teorias adotadas para a explicação do modelo atômico.

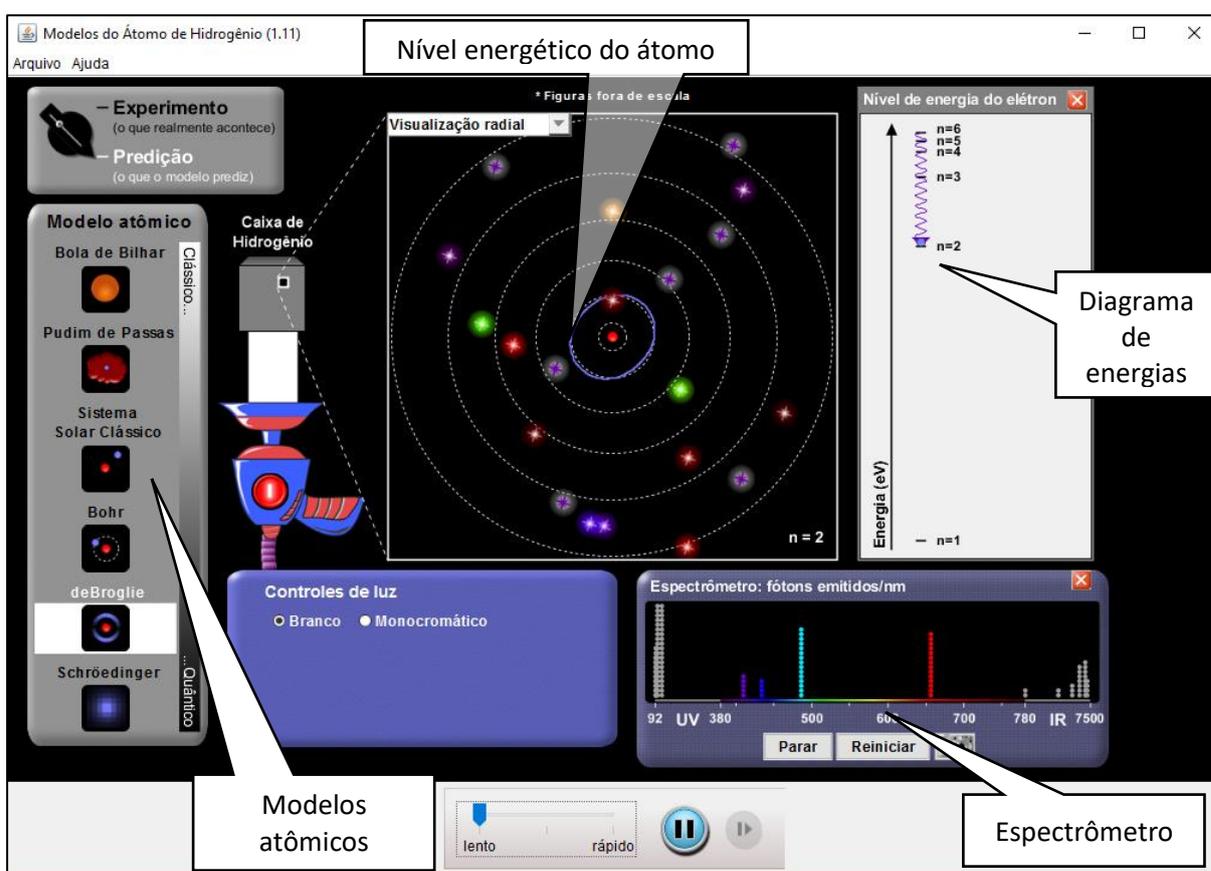


Figura 34: simulação computacional sobre os modelos do átomo de hidrogênio. FONTE: captura de tela.

- Possibilidades educacionais: a simulação permite que se comparem os modelos atômicos, adotados pela ciência, em ordem cronológica: os modelos clássicos da bola de bilhar de Dalton, do pudim de passas de Thomson e do sistema solar de Rutherford, o modelo semiclássico de Bohr, e os modelos quânticos de Heisenberg e de Broglie, e de Schrödinger. Cada modelo é mostrado num diagrama onde, dependendo do escolhido, pode-se visualizar o comportamento do átomo segundo o modelo, seus níveis de energia, e os fótons emitidos pelo

⁷⁶ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/hydrogen-atom. Acesso em 03/02/17.

átomo devido a sua interação com a radiação, por meio de um espectrômetro. Entretanto, a grande possibilidade da simulação é seu poder de comparação. Pode-se explorar as diferenças entre os modelos, as falhas de cada um, e discutir como se deu a construção do conhecimento científico, com avanços e retrocessos, para que hoje se tenha um modelo teórico muito mais claro, além de bastante condizente com a realidade.

- Forma de utilização: após a discussão acerca do princípio da incerteza de Heisenberg, e apoiado em de Broglie, deve-se discutir um novo modelo atômico que atenda aos novos conceitos balizadores da Física naquele momento. Dessa forma, sugere-se a discussão, com maior ênfase, do modelo intitulado, pela simulação, de “deBroglie”, mas sem que se perca a oportunidade de revisar os modelos anteriores, que apesar de incompletos e sem atualidade biológica, têm bastante importância no entendimento de como se dá a evolução dos conceitos da ciência como um todo. O modelo de Schrödinger, último e mais completo, pode não ser abordado por necessitar de alguns subsunçores que talvez os alunos ainda não possuam.

APÊNDICE 3

Ondas de matéria: todo corpo possui um comprimento de onda associado?

A resposta é sim! Mas até onde se pode verificar e mensurar o fenômeno?

Exemplo 1: elétron se deslocando a 1% da velocidade da luz

Dados:

Massa do elétron $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Velocidade do elétron: $v_e = 3,0 \times 10^6 \text{ m/s}$

Da Equação 18

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}}{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3,0 \times 10^6 \text{ m/s}} \cong 2,43 \times 10^{-10} \text{ m} = \mathbf{2,43 \text{ \AA}}$$

Observação: *Ångström* $\equiv 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

O elétron descrito possui um comprimento de onda de $2,43 \text{ \AA} = 0,243 \text{ nm}$, e encontra-se na faixa dos raios X (para comparação, a luz visível encontra-se entre 400 e 750 nm, aproximadamente). Assim, o comportamento ondulatório do elétron pode ser verificado! A

difração de elétrons é utilizada em diversas aplicações tecnológicas, principalmente no estudo da composição de materiais (composição química, estrutura cristalina, etc.).

Exemplo 2: bola de futebol chutada por um jogador

Dados (estimados):

Massa da bola: $m_b = 0,5 \text{ kg}$

Velocidade da bola: $v_b = 30 \text{ m/s}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}}{0,5 \text{ kg} \cdot 30 \text{ m/s}} \cong 4,4 \times 10^{-35} \text{ m}$$



Deve-se lembrar que, para ser obstáculo a uma onda (e ocorrer algum fenômeno ondulatório), uma barreira deve possuir um tamanho equivalente à mesma ordem de grandeza do comprimento da onda! Para se ter uma ideia, o núcleo de um átomo possui um diâmetro aproximado de 10^{-15} m . O comprimento de onda da bola é cerca de 20 ordens de grandeza menor! Com isso, por mais que o fenômeno ondulatório seja previsto, ele não é observado em corpos de grandes dimensões. Mas qual é o limite entre o comportamento clássico e o quântico?

Exemplo 3: molécula de **Fulereo** C_{60} (forma alotrópica do carbono, semelhante a uma bola de futebol, onde existe um átomo de carbono em cada vértice da figura) se deslocando a 0,1% da velocidade da luz.

Dados:

Massa do fulereo: $m_F = 1,2 \times 10^{-24} \text{ kg}$

Velocidade do fulereo: $v_F = 3,0 \times 10^5 \text{ m/s}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}}{1,2 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot 3,0 \times 10^5 \text{ m/s}} \cong 1,8 \times 10^{-15} \text{ m}$$



$10^{-15} \text{ m} \rightarrow$ Fentômetro (ou fermi), equivale ao tamanho do núcleo de um átomo.

Ou seja, no Fulereo ainda se pode perceber o comportamento ondulatório.

Quarto Encontro: A borracha quântica: discussão e apresentação do experimento

TEMPO SUGERIDO

90 minutos (2 horas-aula)

INTRODUÇÃO

Pequena revisão

Após os revolucionários trabalhos de Planck e Einstein, no início do século XX, a Física inaugurou uma nova fase em sua história. De um campo de estudo que estava praticamente saturado e resolvido, os novos estudos abriram um horizonte que se expande até os dias atuais.

A radiação, antes entendida como uma onda, mostrou que também podia se comportar como partícula. Compton, realizando um experimento de difração de raios X, conseguiu comprovar que os fótons se comportavam como partículas e possuíam momentum linear. De Broglie, por sua vez, arbitrou que poderia haver uma simetria entre a matéria e a radiação, e com isso as partículas deveriam ter um comprimento de onda associado. Davisson, Germer e Thomson comprovaram experimentalmente, através de um experimento de difração de elétrons, que de Broglie estava correto em sua teoria. Assim, estava formado o entendimento de que tanto a luz quanto a matéria podiam se comportar de maneiras diferentes, na teoria que ficou conhecida como dualidade onda-partícula.

Não bastasse a estranheza dessa constatação, Heisenberg propôs que, devido à natureza da interação entre fótons e partículas, é impossível medir, com precisão e simultaneidade, a posição e o momentum linear de uma partícula quântica. Tal imprecisão foi denominada princípio da incerteza, e ocorre porque o ato de medir um sistema físico, particularmente um sistema quântico, acaba por interferir no próprio sistema, uma vez que na interação entre a radiação e a matéria há uma considerável transferência de momentum linear. Essa nova visão acerca da Física provocou profundas modificações na concepção da ciência, resultando na modificação de vários modelos adotados na época, inclusive do modelo atômico.

DESENVOLVIMENTO

Parte 1 – Os princípios fundamentais da Mecânica Quântica

Os estudos até aqui relatados, somados a outros tantos não mencionados, provocaram uma profunda transformação na maneira como os pesquisadores pensavam a Física, sendo talvez a mudança mais dramática da história da ciência. O novo entendimento da realidade microscópica abriu um novo campo de estudo que ficou conhecido como *Mecânica Quântica*, numa referência clara aos *quanta*⁷⁷ de energia de Planck. Apesar de ainda precários, se comparados a hoje, os meios de comunicação da época serviram como facilitadores do desenvolvimento desse novo ramo, de modo que se iniciou uma verdadeira corrida para encontrar a teoria que melhor explicasse o comportamento quântico.

A fim de desvendar os mistérios escondidos por detrás dos fenômenos quânticos, que não eram intuitivos e se diferenciavam bastante da Mecânica Newtoniana, várias interpretações foram sugeridas para esclarecer tais fatos. Essas interpretações diferiam entre si principalmente porque a Mecânica Quântica opunha aspectos físicos e filosóficos. Dependendo do princípio tratado, podiam haver discordâncias quanto à sua interpretação. Assim, esta proposta educacional segue a chamada *Interpretação de Copenhague*, e proposta por *Werner Heisenberg* e *Niels Bohr*⁷⁸, quando estes trabalhavam juntos, na capital da Dinamarca, em 1927. A Interpretação de Copenhague apresenta alguns problemas e controvérsias quando confrontada com outras interpretações, mas foi adotada porque, além de ser a mais comumente utilizada para descrever os princípios fundamentais da Mecânica Quântica, permite uma excelente analogia com o cotidiano através do *experimento mental do gato de Schrödinger*, que será discutido na Parte 2.

A Mecânica Quântica é descrita, conceitual e matematicamente, através de *postulados*. Por uma questão didática e metodológica, e levando em consideração um dos referenciais teóricos desta proposta, – a transposição didática – os postulados da Mecânica Quântica serão substituídos pela expressão *princípios fundamentais da Mecânica Quântica*, e serão tratados de maneira qualitativa, uma vez que não se adequam ao nível intelectual dos alunos, nem tampouco à proposta didática deste produto educacional, devido principalmente à complexa matemática

⁷⁷ Em latim, plural de quantum, significa quantidade e refere-se à ideia de quantização.

⁷⁸ Niels Henrik David Bohr (1885-1962), físico dinamarquês. Teve intensa participação na formulação da teoria quântica, e propôs o primeiro modelo atômico baseado nela. Por esse trabalho, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1922.

com a qual são descritos. Assim, sempre que tal expressão surgir, a partir desse ponto, deve-se entender que faz referência direta aos postulados da Mecânica Quântica.

O primeiro princípio abordado é a chamada **função de onda**. Cada partícula ou objeto do universo pode ser descrita por uma função de onda, que possui um determinado valor em cada ponto do espaço. A função de onda é obtida matematicamente, sendo a solução da *Equação de Schrödinger*, que foi formulada por *Erwin Schrödinger*⁷⁹ em 1926. A Equação de Schrödinger é o principal descritor da Mecânica Quântica, e equivale às equações de movimento da Mecânica Clássica. Ela determina todas as propriedades observáveis de um sistema físico, no espaço e no tempo. Uma das representações possíveis da Equação de Schrödinger, na forma unidimensional, é apresentada na Equação 20.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + U(x) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} \quad [20]$$

A simples observação da Equação 20 já denota o motivo do caráter qualitativo desta proposta educacional, uma vez que é uma equação diferencial, com partes real e imaginária, e não consta dos currículos do Ensino Médio. Entretanto, sua interpretação é simplificada quando analisada sob o ponto de vista da conservação da energia, um dos pilares da teoria física e que vale tanto para a Mecânica Clássica quanto para a Quântica. A primeira parcela, à esquerda da igualdade da Equação 20, diz respeito à energia cinética da partícula, e a segunda parcela refere-se à energia potencial. As parcelas, somadas, resultam na energia total do sistema, à direita da igualdade, do mesmo modo como ocorre na Mecânica Clássica.

Mas se a função de onda é a solução matemática da Equação de Schrödinger, qual o significado físico dessa solução? De acordo com a interpretação adotada, a solução apresenta todos os possíveis **estados permitidos** (também chamados de observáveis) daquele sistema físico, sendo este outro princípio fundamental. Assim, um estado é uma possibilidade apresentada por um sistema físico que pode (ou não) ser observada. Um bom exemplo do conceito de estado são os níveis de energia possíveis para o átomo de hidrogênio, onde cada nível corresponde a uma energia bem determinada. Convém ressaltar que esses valores de energia podem ser obtidos experimentalmente, e também são solução da Equação de Schrödinger para o átomo de hidrogênio. Ambos os resultados, teórico e experimental,

⁷⁹ Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961), físico austríaco. Um dos principais colaboradores da teoria quântica, sobretudo quanto à formulação de um descritor matemático para a mesma. Por seu trabalho, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1933.

coincidem. A Figura 35 traz um diagrama dos níveis de energia do átomo de hidrogênio, com seus respectivos valores quantizados.

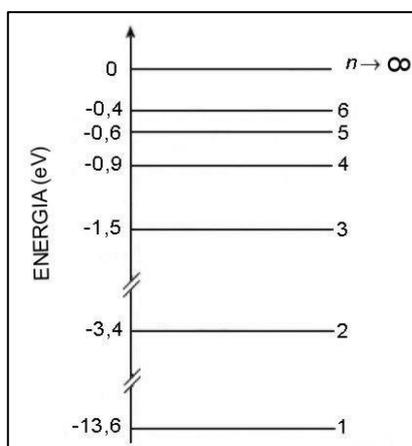


Figura 35: diagrama dos níveis de energia do átomo de hidrogênio⁸⁰.

Se o conceito de estado não causa grande surpresa – ou estranheza – quanto ao seu significado, o próximo princípio fundamental pode causar. A solução da Equação de Schrödinger determina os possíveis estados observáveis de um sistema físico, e não há um limite para a quantidade deles. Assim, enquanto não é feita nenhuma observação, em qual estado o sistema físico se encontra? Novamente, pela interpretação adotada, diz-se que o sistema físico assume todos os estados possíveis de maneira simultânea. É a chamada **superposição de estados**, e significa que todos os estados coexistem ao mesmo tempo enquanto nenhum deles é observado.

Se todos os estados preditos pela função de onda estão coexistindo simultaneamente, existe um estado preferencial, ou uma maneira de saber qual o estado será assumido pelo sistema físico estudado? A resposta é não, o estado somente será conhecido quando for observado. Mas um estado pode ter maior possibilidade de ser observado em relação a outro. Esse princípio é chamado de **probabilidade**, e surge de uma operação matemática⁸¹ que envolve a normalização do quadrado da função de onda. Esse recurso matemático possibilita que se conheça, numericamente, qual a possibilidade de se observar cada estado predito pela função de onda.

⁸⁰ Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAwGUAA/teoria-quantica-atomo-hidrogenio>.

⁸¹ A matemática utilizada para descrever a Mecânica Quântica é muito mais complexa do que a que será apresentada neste produto educacional. O princípio da probabilidade, por exemplo, é calculado a partir da densidade de probabilidade de se encontrar uma partícula numa determinada região do espaço, que é o resultado da normalização do quadrado da função de onda. Por fugir dos objetivos desta proposta de ensino, essa complexa descrição matemática será propositadamente omitida. O leitor mais curioso poderá encontrar em Sakurai e Napolitano (2013) uma boa fonte de consulta sobre o assunto.

Mas o que significa, fisicamente, observar algum estado? De acordo com a interpretação adotada⁸², o ato de observar algum dos estados possíveis nada mais é do que realizar uma **medição** do sistema físico em questão. A medição é outro princípio da Mecânica Quântica. E é nesse ponto, principalmente, que as diversas interpretações quanto à teoria começam a divergir. Deve-se lembrar, quando da abordagem do princípio da incerteza de Heisenberg, que a simples observação de sistemas quânticos acaba por modificá-los, uma vez que na interação da radiação com a matéria há transferência de energia através do momentum linear dos fótons. Quando se trata dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, o simples ato de medir qualquer propriedade observável do sistema físico em questão também altera tal sistema. A função de onda, descrita inicialmente por n-estados possíveis, acaba por se alterar, passando dos vários n-estados a um único estado medido. Esse princípio é chamado de **colapso da função de onda**, e é um dos pontos mais controversos da Interpretação de Copenhague. Interpretações paralelas, como a *Interpretação de Muitos Mundos* ou a *Interpretação de Bohm*⁸³ discordam da Interpretação de Copenhague ao afirmarem que a função de onda não colapsa, mas evolui conforme cada teoria.

De um modo geral, os princípios fundamentais da Mecânica Quântica podem ser descritos da seguinte maneira: a toda partícula (ou sistema físico qualquer) cabe uma função de onda, que descreve como se dará sua evolução no tempo e no espaço. Essa função de onda é a solução da Equação de Schrödinger aplicada à partícula, e estabelece todos os seus estados possivelmente observáveis. Enquanto nenhuma medição é realizada, a partícula encontra-se numa superposição de estados, isto é, todos os estados possíveis estão coexistindo simultaneamente. A função de onda também estabelece a probabilidade de cada estado ser observado. Realizada a medição, ocorre o colapso da função de onda, ou seja, a mesma evolui de n-estados possíveis para o estado observado. A Equação 21 traz um exemplo de função de onda. A função apresenta três estados possíveis, ψ_A , ψ_B e ψ_C , e a cada estado cabe sua respectiva probabilidade de observação x , y e z .

$$\Psi = x\psi_A + y\psi_B + z\psi_C \quad [21]$$

Suponha-se que tenha ocorrido a medição do sistema físico, e o estado observado foi o estado ψ_A . Ocorre então o colapso da função de onda, ou seja, a função que descrevia três

⁸² Heisenberg chegou a dizer que o ato de medir cria a realidade que observamos.

⁸³ Propostas pelos físicos norte-americanos *Hugh Everett* e *David Bohm*, respectivamente.

estados possíveis, com as respectivas probabilidades de observação de cada estado, passa a conter apenas o estado observado, como mostra a Equação 22.

$$\Psi = \psi_A \quad [22]$$

Como forma de ilustrar, exemplificar e facilitar o aprendizado dos estudantes, a fim de que os mesmos consigam formar os subsunçores necessários para que ocorra a aprendizagem significativa, recomenda-se agora uma série de atividades didáticas: uma simulação computacional, um vídeo explicativo, uma analogia através do experimento mental do gato de Schrödinger, culminando com o experimento da borracha quântica. Em todas essas atividades, os princípios fundamentais da Mecânica Quântica poderão ser verificados, analisados e discutidos com os alunos. Acredita-se, baseado em experiências anteriores, que essa interação é fundamental para a formação dos referidos subsunçores.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 6

Experimento de interferência quântica

Neste ponto, sugere-se novamente a utilização da Simulação Computacional 6, sobre a interferência quântica, empregada no Terceiro Encontro, utilizando as opções *Alta intensidade* e *Partícula única* simultaneamente, com um obstáculo do tipo dupla-fenda, com as mesmas dimensões para ambas opções, com partículas do tipo elétrons. A intenção de tal simulação é mostrar na prática, através de um experimento virtual, todos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica aqui estudados.

Estabelecido o sistema físico em questão, tem-se que a partícula pode, a princípio⁸⁴, chegar ao anteparo, passando pela fenda da direita ou da esquerda, com a mesma chance. Sendo assim, a **função de onda** que a descreve possui dois **estados** possíveis, $\psi_{direita}$ e $\psi_{esquerda}$. Como se supõe que as fendas possuem as mesmas dimensões, pode-se afirmar que a **probabilidade** de a partícula passar por qualquer das fendas é a mesma. Assim, uma das formas possíveis para a função de onda do sistema em questão é

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{direita} + \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{esquerda}, \quad [23]$$

⁸⁴ Numa visão clássica do experimento.

que quando aplicadas as condições de normalização, dará a probabilidade de 50% para a partícula passar por qualquer das fendas.

Observando o anteparo na opção *Alta intensidade*, pode-se perceber a formação de uma figura de interferência. Tal situação ocorre porque, classicamente, o feixe de elétrons que passa pela fenda da esquerda interfere com o feixe que passa pela fenda da direita, indicando o caráter ondulatório da matéria, e corroborando mais uma vez a teoria de de Broglie. Já na opção *Partícula única*, após um certo tempo, também se percebe a ocorrência da figura de interferência no anteparo, como visto na Figura 31. Mas tal fato não é explicado pela Física Clássica, uma vez que os elétrons são lançados individualmente! Aqui cabe apenas a explicação quântica: o elétron interfere consigo mesmo ao passar pelas fendas! Mas por qual fenda ele passou? De acordo com a teoria quântica, para que o elétron interfira consigo mesmo, ele deve passar simultaneamente por ambas as fendas! Essa é a única interpretação possível para que ocorra a interferência, e mostra a estranheza que permeia a Mecânica Quântica.

Caso o leitor não esteja convencido sobre essa interpretação, pode-se tentar verificar por qual fenda o elétron está passando, utilizando um detector em qualquer das fendas. Fazendo isso na opção *Alta intensidade*, ocorre a perda da figura de interferência, sendo a mesma substituída por um simples “borrão”. Na opção *Partícula única* ocorrerá o mesmo, após decorrido um certo tempo. Em ambos os casos, não há uma explicação clássica para o ocorrido. A única explicação possível encontra amparo na Mecânica Quântica. Analisando o fato à luz dos princípios fundamentais, a utilização de um detector em uma das fendas nada mais é do que realizar a **medição** de uma propriedade observável do sistema físico. Enquanto o detector não era utilizado, a função de onda permanecia intacta e havia a **superposição dos estados** possíveis, ou seja, $\psi_{direita}$ e $\psi_{esquerda}$. Com o detector instalado, é possível obter informações a respeito do elétron, ocorrendo o **colapso da função de onda**. Com isso, a função de onda tomará uma das formas da Equação 24.

$$\Psi = \psi_{direita} \quad \text{ou} \quad \Psi = \psi_{esquerda} \quad [24]$$

Aqui também se percebe uma questão interessante a respeito da dualidade onda-partícula: o elétron se desloca como uma onda, mas ao tentar detectá-lo, se comporta como partícula. Tal situação também pode ser simulada com outros tipos de partículas, como fótons, nêutrons e átomos de hélio, todas opções fornecidas pela simulação computacional.

VÍDEO 1

“Dr. Quantum – fenda dupla”⁸⁵

O vídeo é autoexplicativo, legendado, e simula condições semelhantes às da Simulação Computacional 6, onde podem mais uma vez ser explorados todos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica.

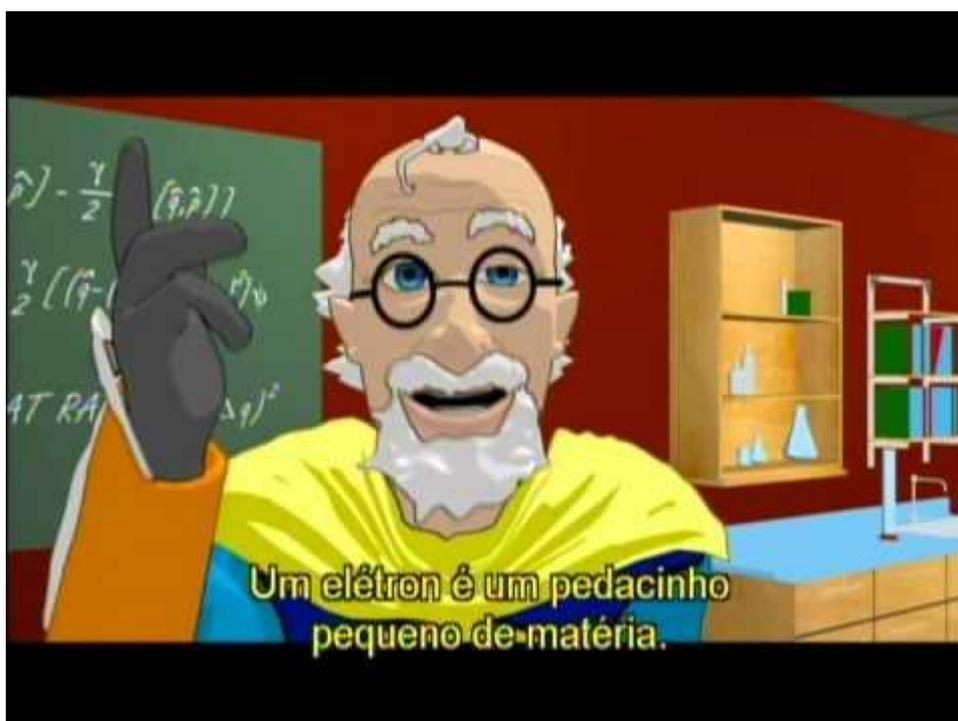


Figura 36: vídeo “Dr. Quantum – fenda dupla”. FONTE: captura de tela.

DESENVOLVIMENTO

Parte 2 – O gato de Schrödinger

Dentre os análogos clássicos para o entendimento dos fenômenos quânticos, o gato de Schrödinger talvez seja o mais consagrado. Proposto por Erwin Schrödinger, um dos principais responsáveis pela formulação da teoria quântica, o experimento mental tenta ilustrar o quão estranha a teoria pode parecer, sob o ponto de vista da Interpretação de Copenhague e à luz dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica.

⁸⁵ Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=zKiCEU6P3U0>. Acesso em: 16 março 2017.

O experimento mental é descrito da seguinte forma: tem-se um gato, enclausurado em uma caixa completamente fechada, onde dela nenhuma informação é obtida a não ser que seja aberta. A abertura da mesma equivale a realizar uma **medição** do sistema. Em seu interior, além do gato, existe um frasco com ácido cianídrico, ao alcance de um martelo acoplado em um gatilho. Este gatilho é acionado caso aconteça o decaimento⁸⁶ de uma substância radioativa, lá existente. A **probabilidade** da ocorrência ou não do decaimento é a mesma após um certo tempo. Assim, os **estados** possíveis para o sistema físico descrito são dois: o gato pode estar *vivo* ou *morto*, conforme ilustra a Figura 37, e sua **função de onda** pode ter a forma da Equação 25.

$$\Psi_{gato} = \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{vivo} + \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{morto} \quad [25]$$

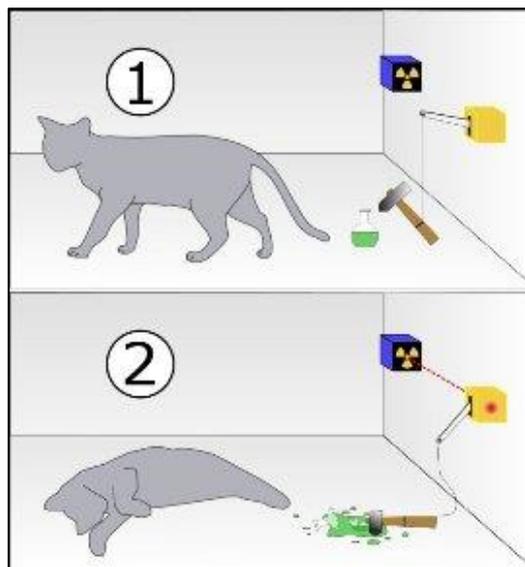


Figura 37: estados possíveis para o gato quando da abertura da caixa⁸⁷: vivo (1) ou morto (2).

Aplicando as condições de normalização⁸⁸, tem-se a mesma probabilidade de encontrar o gato, vivo ou morto, quando da abertura da caixa.

⁸⁶ Decaimento é o nome do processo de desintegração de um núcleo atômico instável, em que ocorre a liberação de energia através da emissão de partículas subatômicas ou radiação.

⁸⁷ Fonte: <http://www.karmanews.it/15007/il-multiverso-che-dicono-i-fisici>.

⁸⁸ Cujos cálculos não serão demonstrados pelos motivos expostos anteriormente.

É natural se pensar que, ao abrir a caixa, verificar-se-á que o gato assumiu um dos estados possíveis mostrados na Figura 37. Por outro lado, enquanto a caixa não é aberta, que afirmações se pode fazer a respeito de seu estado? De acordo com o princípio da **superposição de estados**, deve-se considerar que o gato está, ao mesmo tempo, vivo e morto! (Da mesma forma que se considerou que o elétron passava por ambas as fendas na simulação anterior). A Figura 38 ilustra o princípio da superposição de estados. A não medição de alguma propriedade observável do sistema físico mantém a integridade da função de onda, e nesse caso deve-se levar em conta que todos os estados possíveis coexistem simultaneamente. Uma vez aberta a caixa, observar-se-á o gato vivo ou morto, pois nesse momento terá ocorrido o **colapso da função de onda**.

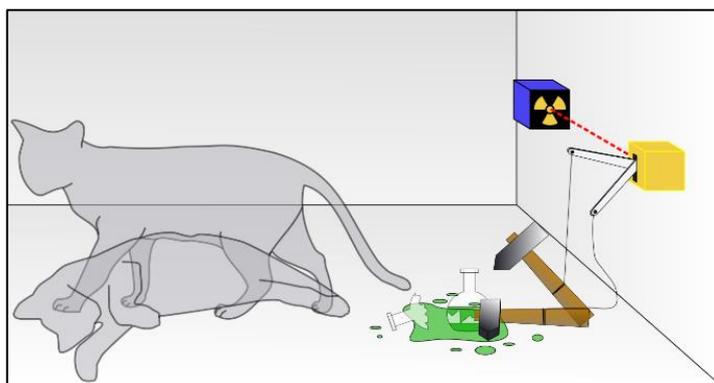


Figura 38: superposição dos estados possíveis para o gato dentro da caixa⁸⁹.

Outras interpretações da Mecânica Quântica divergem da Interpretação de Copenhague. A Interpretação de Muitos Mundos de Everett, por exemplo, leva em consideração a ideia de multiversos⁹⁰. Segundo ela, quando da medição do estado do gato, ao invés de ocorrer o colapso da função de onda, acontece uma divisão do universo – que contém o observador e o sistema físico – em outros dois universos, onde num deles o observador encontrará o gato vivo e, em outro, encontrará o gato morto. Esse pequeno exemplo ilustra as discordâncias existentes entre as diversas interpretações da teoria quântica, sendo que a grande maioria delas encontra respaldo porque simplesmente não se pode ver o que ocorre a nível quântico, diferentemente do mundo macroscópico que nos rodeia. Assim, não se pode negar que a Mecânica Quântica possui um forte cunho filosófico. Schrödinger chegou a afirmar que a realidade somente existe porque a observamos; se não houvessem observadores, não haveria a realidade.

⁸⁹ Multiverso é o conjunto dos possíveis universos paralelos advindos de algumas interpretações da Mecânica Quântica.

⁹⁰ Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Gato_de_Schr%C3%B6dinger.

VÍDEO 2

“Gato de Schrödinger – The Big Bang Theory”⁹¹

Como forma de descontrair os alunos, sugere-se a exibição deste vídeo que traz a descrição do experimento mental do Gato de Schrödinger de uma maneira bem-humorada.



Figura 39: vídeo “Gato de Schrödinger – The Big Bang Theory”. FONTE: captura de tela.

DESENVOLVIMENTO

Parte 3 – O experimento da borracha quântica

Não será aqui discutida a forma de montagem do experimento. O trabalho de Junior e Lunazzi⁹² traz uma excelente proposta de montagem e obtenção dos materiais necessários ao experimento. Sugere-se apenas que a montagem experimental e os testes com o material sejam feitos com certa antecedência para que não ocorram imprevistos durante a apresentação do experimento, uma vez que os polarizadores podem não funcionar da maneira esperada. A figura 40 traz um exemplo de montagem do experimento da borracha quântica.

Antes da apresentação do experimento da borracha quântica, cabe uma pequena discussão de duas curiosidades sobre o mesmo. Uma delas diz respeito à tradução do termo

⁹¹ Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=SiiQbwRPVig>. Acesso em: 16 março 2017.

⁹² Disponível em http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2007/JorgeH-MonicaRF.pdf. Acesso em: 16 março 2017.

borracha quântica (do inglês *quantum eraser*). Talvez o termo que melhor traduziria a característica do experimento seria *apagador quântico*, uma vez que, como será visto, o analisador tem a função de apagar qualquer informação obtida sobre os fótons que passaram pelo analisador de caminho. A palavra borracha pode causar certa confusão ao leitor desavisado, que pode interpretá-la como sendo uma borracha escolar (que estaria correto) ou uma liga de borracha qualquer, utilizada para as mais diversas finalidades, e que nada tem a ver com o experimento. Entretanto, o termo borracha quântica continuará a ser empregado ao longo deste trabalho. A outra curiosidade é que a borracha quântica também serve de análogo a outro consagrado experimento, que auxiliou no avanço da Física Quântica: o experimento de Stern-Gerlach. Para uma visão detalhada sobre o assunto, pode-se consultar a obra de Sakurai e Napolitano (2013).



Figura 40: montagem experimental da borracha quântica. FONTE: o autor.

Eis que chega o momento considerado o ápice desta proposta educacional. A borracha quântica trata de assuntos que, apesar de esclarecidos pela Mecânica Clássica (uma vez que o experimento não conta com nenhum aparato tecnológico), podem ser extrapolados para um entendimento de fenômenos quânticos na forma de um experimento mental. Um esquema simplificado da borracha quântica pode ser visualizado na Figura 41. O arranjo experimental pode ser descrito sucintamente como um aparato no qual se tem: uma fonte emissora de luz polarizada (laser); uma junção de dois filmes polarizadores fixos (identificador de caminho), orientados perpendicularmente entre si e com um arame fino na interseção de ambos, a fim de

servir de obstáculo ao feixe de luz; um outro polarizador (analisador), cuja orientação pode ser ajustada em relação ao identificador de caminho; e um anteparo, onde se formarão padrões que serão identificados como sendo características de onda (figura de interferência) ou partícula (vulgo “borrão”).

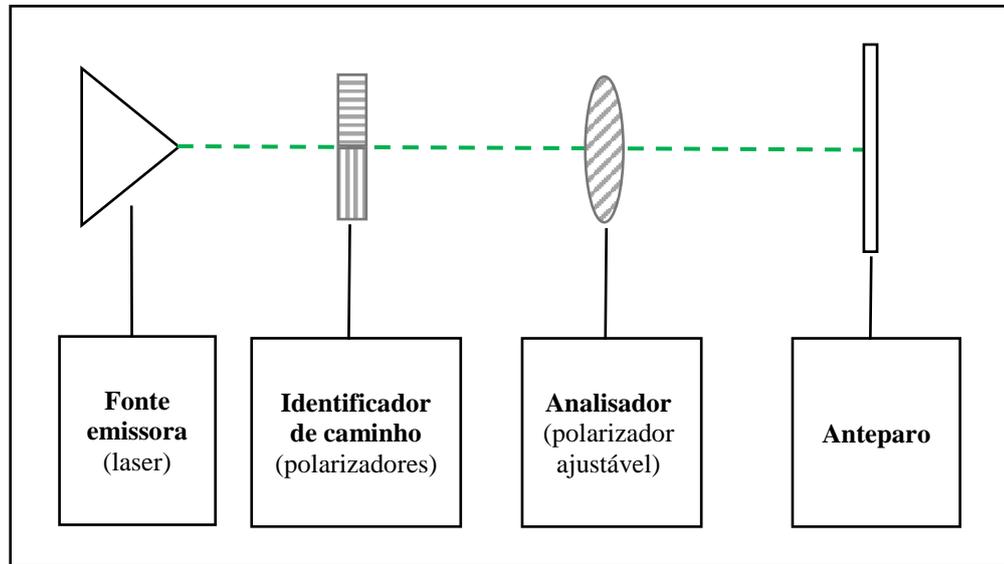


Figura 41: representação esquemática de uma borracha quântica (forma completa). FONTE: o autor.

O primeiro fenômeno que se deseja mostrar aos alunos é a interferência com ondas luminosas, num experimento análogo ao utilizado por Young em sua famosa experiência da dupla-fenda. Para isso, o aparato inicial deve contar apenas com a fonte emissora (um laser), um arame fino (ou até mesmo um fio de cabelo), a fim de servir de análogo ao obstáculo de dupla-fenda (uma vez que dificilmente o laboratório vai dispor de obstáculo de dimensões tão reduzidas), e o anteparo, como mostra a Figura 42. Os alunos devem ser alertados que a fonte emite vários fótons simultaneamente, não sendo possível realizar a emissão de um único fóton por vez, como na simulação computacional.

Aqui pode-se discutir com os alunos quais princípios fundamentais da Mecânica Quântica são identificados: os **estados** possíveis daquele sistema físico, a forma da **função de onda** associada, a **superposição dos estados** possíveis e a **probabilidade** de se conhecer o lado pelo qual os fótons estão passando. Deve-se ressaltar, mais uma vez, que como o experimento não permite a emissão de uma única partícula por vez, tem-se vários fótons passando por ambos os lados ao mesmo tempo, e assim o princípio da probabilidade não se aplica tão bem nessa situação. Nessa configuração, como arame fino funciona como um obstáculo semelhante a uma

dupla-fenda, a imagem obtida no anteparo é uma figura de interferência, similar às verificadas anteriormente nas simulações computacionais.

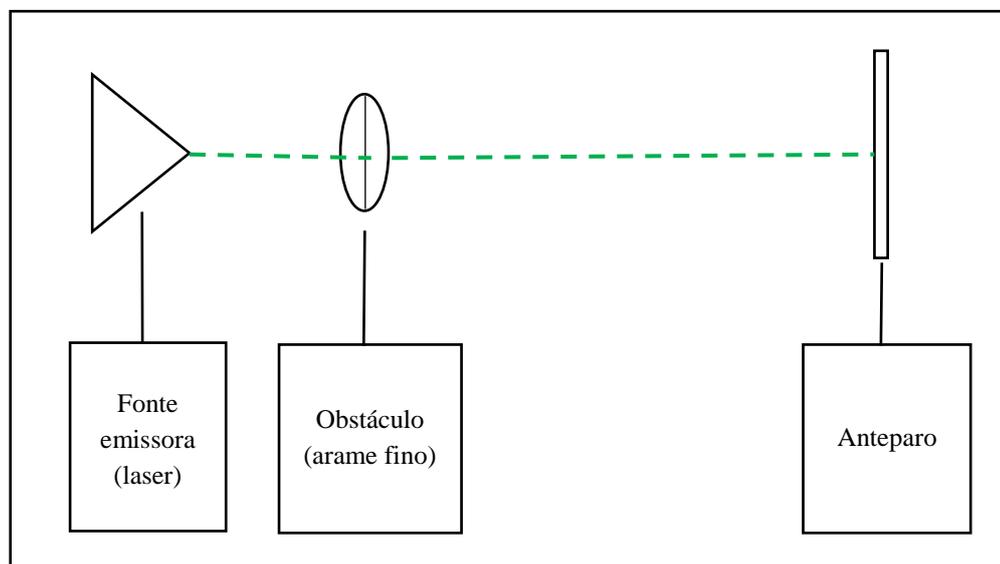


Figura 42: representação esquemática de um experimento de interferência de ondas luminosas. FONTE: o autor.

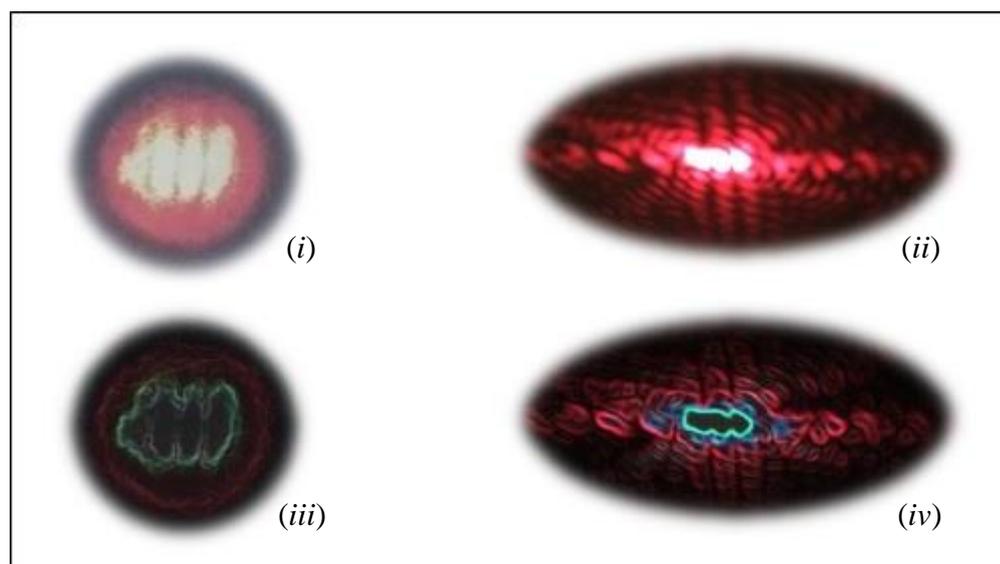


Figura 43: resultados experimentais obtidos com o experimento de interferência de ondas luminosas. FONTE: imagem (i): Hillmer e Kwiat (2007); imagens (ii), (iii) e (iv): o autor.

Dessa forma, os resultados alcançados pelo usuário deste produto educacional devem se parecer com as imagens superiores da Figura 43. A imagem (i) traz o resultado experimental obtido por Hillmer e Kwiat (2007)⁹³, e que serviu de base a esta proposta educacional. A figura (ii) traz o resultado experimental obtido em sala de aula, durante a aplicação do projeto. Para fins de comparação, as figuras superiores são imagens retiradas diretamente dos anteparos,

⁹³ HILLMER, R.; KWIAT, P. A do-it-yourself quantum eraser. *Scientific American*, New York, v. 296, n. 5, p. 72-77, May 2007.

sendo que a obtida em sala não possui nenhum tipo de tratamento especial. Já as figuras inferiores, (iii) e (iv), são as mesmas imagens, porém submetidas a um filtro de efeito artístico, cuja finalidade é deixar apenas as extremidades brilhantes, diminuindo o excesso de luz e dando ênfase às bordas da imagem, tudo no intuito de facilitar a percepção e verificar se ali pode ser identificado algum padrão conhecido ou esperado. Esse mesmo tratamento foi aplicado em todos os resultados que são apresentados na sequência. Dessa forma, pode-se perceber que ambos os experimentos conseguiram, de alguma maneira, obter uma figura de interferência, como era esperado, já que o experimento simula, nessa configuração, um obstáculo do tipo dupla-fenda.

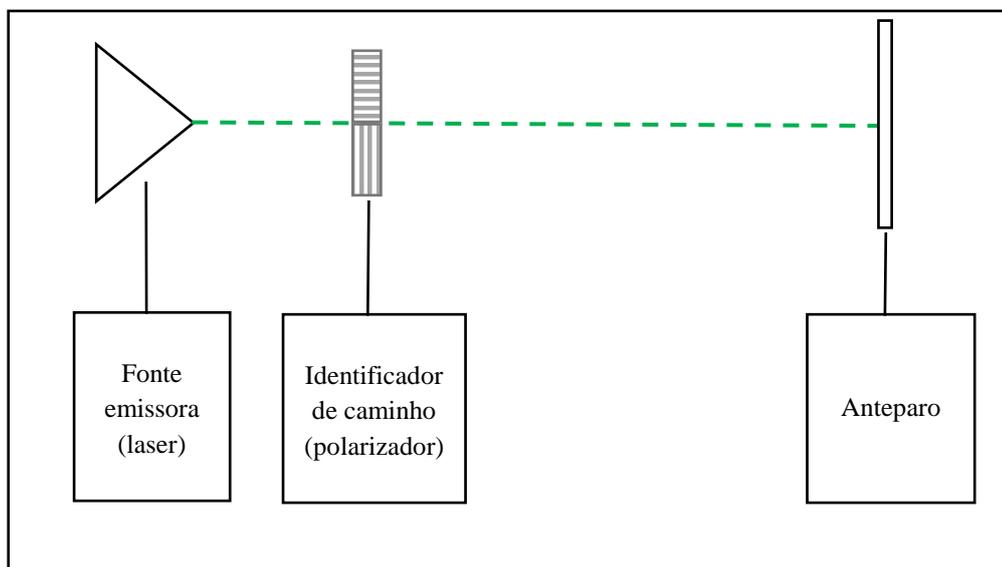


Figura 44: representação esquemática do experimento da borracha quântica, quando montada apenas com o identificador de caminho. FONTE: o autor.

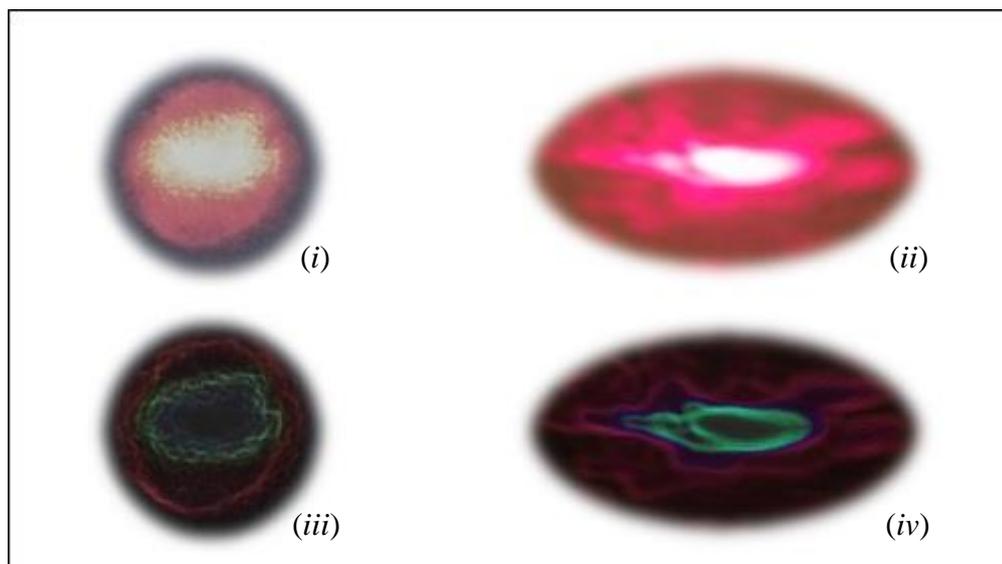


Figura 45: resultados experimentais obtidos com a borracha quântica, quando montada apenas com o identificador de caminho. FONTE: imagem (i): Hillmer e Kwiat (2007); imagens (ii), (iii) e (iv): o autor.

A seguir, o arame fino deve ser substituído pelo filtro polarizador, que faz o papel do identificador de caminho, conforme retratado na Figura 44. Quando o experimento adquire essa configuração, o identificador de caminho polariza os fótons que passam pela esquerda e pela direita do arame de acordo com a orientação dos polarizadores (horizontal ou vertical). Com isso, obtém-se alguma informação a respeito dos fótons, o que equivale, dentro dos princípios estudados, a realizar uma **medição**, devido à capacidade de seleção dos fótons pelo identificador de caminho. Isso, segundo a interpretação utilizada, causará o **colapso da função de onda**, evento que pode ser verificado pela perda da figura de interferência projetada no anteparo.

De fato, o que se obtém é uma imagem do tipo borrão, como mostra a imagem (ii) da Figura 45, a qual se assemelha bastante à imagem (i), alcançada por Hillmer e Kwiat (2007), e situada ao lado. Pode-se perceber com bastante nitidez, inclusive com o auxílio das imagens (iii) e (iv), tratadas com o filtro de efeito artístico, que os padrões de interferência da Figura 43 não mais existem, o que corrobora a ideia do colapso da função de onda. Esse resultado deve ajudar os alunos a compreender ainda mais os princípios estudados, de maneira a convencê-los de que, apesar de estranha à sua realidade, a Mecânica Quântica faz sentido quando estudada de uma forma estruturada.

Finalmente, deve ser inserido no experimento o segundo polarizador, que faz a figura do analisador, e deixa o experimento da borracha quântica completo, conforme mostrado na Figura 41. O analisador deve ser colocado inicialmente na orientação horizontal, o que obrigatoriamente o deixa perpendicularmente orientado em relação a um dos polarizadores do identificador de caminho, e paralelamente orientado em relação ao outro. Com isso, metade dos fótons são bloqueados pelo analisador, enquanto a outra metade não é afetada. O resultado prático dessa configuração é um acúmulo dos fótons em um dos lados do borrão, que equivale à orientação de polarização do analisador. Mesmo que essa parte do experimento não venha a abranger nenhum princípio específico dos que foram estudados, é interessante mostrar aos alunos como pode se dar a manipulação dos fótons em um experimento que utiliza filtros polarizadores.

A Figura 46, a exemplo das demais, traz na imagem (ii) o resultado experimental obtido em sala de aula, em comparação com os resultados alcançados por Hillmer e Kwiat (2007), que utilizaram o analisador nas orientações horizontal e vertical, visto na imagem (i). Mais uma vez, pode-se perceber que há semelhança com relação ao padrão dos dois experimentos. Verifica-se, também, que o resultado experimental obtido em sala de aula está com os fótons mais

concentrados à direita, quando comparado com o resultado exposto imagem (ii) da Figura 45, o que comprova a capacidade de manipulação dos fótons.

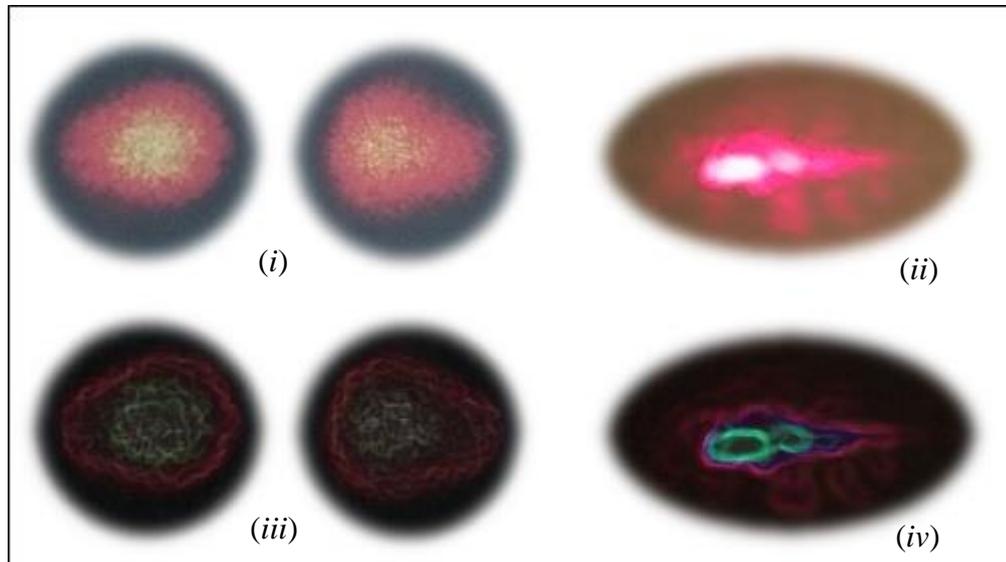


Figura 46: resultados experimentais obtidos com o experimento da borracha quântica (seleção de fótons).
 FONTE: imagem (i): Hillmer e Kwiat (2007); imagens (ii), (iii) e (iv): o autor.

Pelo que foi apresentado até aqui, o experimento da borracha quântica, a exemplo da Simulação Computacional 6 e do experimento mental do gato de Schrödinger, consegue tratar de todos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica estudados. Se montada conforme a Figura 42, tem-se um sistema físico que pode ser descrito por uma **função de onda** a ele associada, cujo quadrado de seu módulo dá a **probabilidade** de se encontrar um dos dois **estados** possíveis. Apesar de um número imenso de fótons estar passando pelos dois lados do arame ao mesmo tempo, quanticamente se pode entender que cada fóton interfere consigo mesmo, formando uma figura de interferência sobre o anteparo. Além disso, não se pode afirmar por qual lado do arame o fóton está passando, e com isto tem-se a **superposição de estados**. Ao se montar o experimento conforme a Figura 44, tem-se aí uma tentativa de obter informações a respeito do fóton, o que configura uma **medição** e o conseqüente **colapso da função de onda**, resultando na perda do padrão de interferência no anteparo. As informações decorrentes da tentativa de medição dos fótons se materializam na Figura 46, com uma maior concentração deles ocorrendo à esquerda ou à direita da posição inicial, de acordo com o posicionamento do analisador.

A teoria quântica aqui estudada, de acordo com a Interpretação de Copenhague, prevê que, uma vez colapsada, a função de onda não pode mais retomar sua forma original naquele determinado sistema físico. Ou seja, a informação perdida não pode mais ser recuperada. Mas, de alguma forma, seria possível readquirir essa informação?

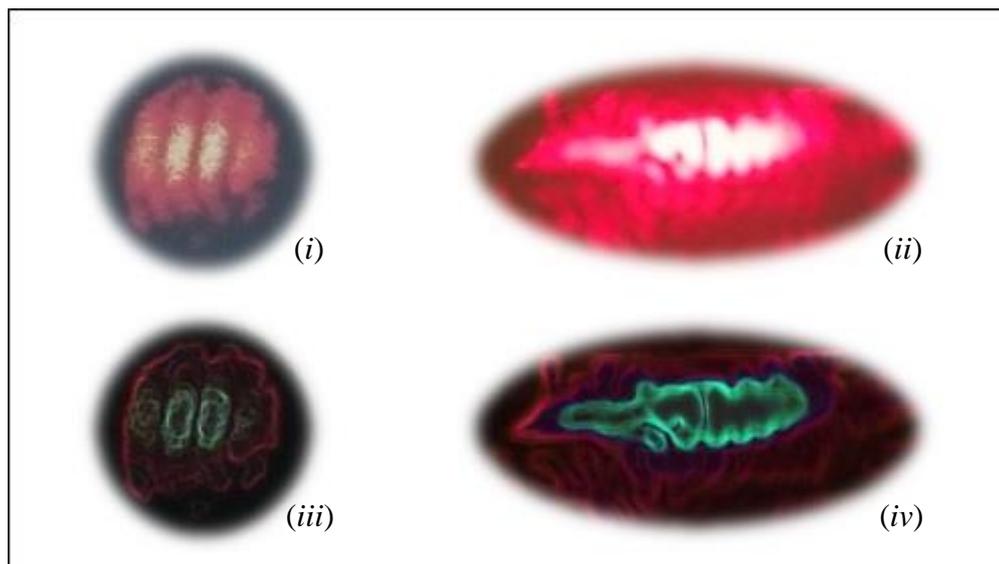


Figura 47: resultados experimentais obtidos com o experimento da borracha quântica (reaparecimento das franjas de interferência). FONTE: imagem (i): Hillmer e Kwiat (2007); imagens (ii), (iii) e (iv): o autor.

A grande surpresa do experimento da borracha quântica é que o padrão das franjas de interferência, perdido por ocasião da atuação do identificador de caminho, pode ser recuperado. Para isso, basta girar o analisador de 45° em qualquer sentido, horário ou anti-horário, e tem-se o restabelecimento do padrão de interferência. Isso acontece porque o analisador consegue “apagar” a informação obtida através do identificador de caminho, sobre por qual lado do arame o fóton passou, permitindo que o mesmo readquirira sua polarização original. Assim, devido a essa nova configuração do experimento, cada fóton com polarização vertical ou horizontal tem a mesma chance de ter passado por um dos lados do arame, uma vez que nada mais se sabe a seu respeito. O resultado prático disso é o reaparecimento das franjas de interferência, o que pode ser verificado na imagem (ii) da Figura 47.

Aqui percebe-se novamente que o resultado experimental obtido em sala de aula se aproxima do auferido por Hillmer e Kwiat (2007), visto na imagem (i) da Figura 47. Convém ressaltar que todas as imagens obtidas experimentalmente possuem um padrão que se assemelha às que serviram de base para a comparação. Entretanto, para o experimento da borracha quântica, montado em sala de aula, foram utilizados materiais alternativos e de baixo custo, principalmente os filtros polarizadores – figuras principais do experimento – provenientes de telas LCD de calculadoras e mostradores digitais. A baixa qualidade desses materiais, aliada aos métodos de obtenção dos mesmos, fizeram com que as imagens resultantes dos fenômenos ficassem um tanto quanto visualmente poluídas.

CONCLUSÃO

Analogias: um recurso didático valioso

Apesar de permitir o tratamento de todos os princípios fundamentais da Mecânica Quântica estudados, a borracha quântica é, na verdade, um experimento da Física Clássica. É a chamada restauração clássica do padrão de interferência, sendo sua explicação bem estabelecida pela óptica ondulatória. Um experimento a nível quântico requer manipulação individual de fótons ou partículas, e tal fato só é possível com equipamentos encontrados em avançados laboratórios, o que não é nosso caso. Assim, o experimento estabelece mais uma forma de analogia entre o quântico e o clássico, assim como o fazem a simulação computacional e o experimento mental do gato de Schrödinger. Apesar de alguns autores e teóricos da educação condenarem o uso de analogias, esta proposta educacional entende que elas são a maneira mais fácil e rápida de se conseguir que o estudante tome contato com conceitos de difícil compreensão, altamente abstratos e que fogem ao senso comum, como é a Mecânica Quântica.

Quinto Encontro: Contextualização do mundo quântico que nos rodeia

TEMPO SUGERIDO

90 minutos (2 horas-aula)

INTRODUÇÃO

Pequena revisão

Após o estabelecimento dos alicerces da Mecânica Quântica, através da compreensão da dualidade onda-partícula, e do desenvolvimento de uma nova concepção da Física, a partir das percepções acerca das interações entre a radiação e a matéria, os principais responsáveis pelo entendimento da teoria quântica, Bohr, Heisenberg, de Broglie, Dirac e Schrödinger, entre outros, passaram a tentar interpretar todas as estranhezas que a eles se apresentavam, a partir da observação de diversos fenômenos quânticos, e a buscar um modelo que descrevesse da melhor maneira possível todos eles. Com isso surgiram, ao longo do tempo, diversas interpretações da teoria quântica. Cada uma delas, baseadas em pressupostos básicos com sutis diferenças entre si, descreve corretamente o campo fenomenológico da Mecânica Quântica, com maior ou menor aceitação pela comunidade científica.

A visão aqui adotada, a interpretação de Copenhague, entende que qualquer partícula pode ser descrita por uma função de onda, que é a solução da Equação de Schrödinger para a partícula, e nela estão contidos todos os possíveis estados que podem ser observados naquele sistema físico. Cada estado tem a si associado uma determinada probabilidade de ser observado, estando essa probabilidade diretamente atrelada à função de onda. Enquanto nenhuma observação é realizada sobre o sistema, ou seja, não é procedida a medição de nenhuma propriedade observável, entende-se que todos os estados possíveis estão coexistindo ao mesmo tempo, numa superposição desses estados. Entretanto, na visão da interpretação de Copenhague, o ato de medir altera o sistema físico, fazendo com que ocorra o colapso da função de onda. Esta é a síntese dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, estudados no encontro passado, e que servirão de ponto de partida para a discussão dos próximos assuntos.

Cada tema tratado neste encontro (além de vários outros temas relacionados à Mecânica Quântica) poderia, por si só, ser objeto central de um único encontro. No entanto, devido à

limitação de tempo, optou-se por expor apenas alguns tópicos que, imagina-se, serão de interesse dos estudantes, uma vez que os temas serão apresentados de maneira contextualizada.

DESENVOLVIMENTO

Parte 1 – Tunelamento quântico

Durante o Terceiro Encontro foi discutido o exemplo de uma partícula confinada em um poço quântico de potencial infinito. Como bem se sabe, a Física se utiliza de idealizações para simplificar os problemas que pretende resolver, e este sistema físico é uma dessas situações ideais. Em casos mais próximos da realidade, existem poços (ou currais) quânticos cuja barreira de potencial pode ser bastante grande, mas não infinita. São exemplos de poços quânticos reais os núcleos atômicos, alguns tipos de lasers e grande parte dos componentes eletrônicos, como os diodos.

Entretanto, para facilitar a discussão deste assunto, utilizar-se-á o exemplo da *barreira de potencial*, que nada mais é do que um análogo do poço quântico.

A Figura 48 traz o gráfico de uma barreira de potencial, cuja energia possui um valor V_0 (também chamada de altura da barreira) na região $[-a, a]$, além de uma partícula qualquer, representada apenas pelo valor de sua energia cinética E (linha tracejada), onde $E < V_0$. Além disso, o gráfico apresenta três regiões bem definidas: a região à esquerda da barreira (*I*), a região da barreira (*II*, de largura $2a$), e a região à direita da barreira (*III*). Numa interpretação puramente clássica, uma das situações possíveis desse sistema físico seria de uma partícula qualquer, deslocando-se da esquerda para a direita, que encontra a barreira como obstáculo. Como a energia da partícula é menor do que a energia da barreira, classicamente a partícula não poderia ultrapassá-la. Assim, a partícula só poderia ser encontrada na região *I*. Logo, para essa partícula, a região *I* é dita classicamente permitida, e as regiões *II* e *III* são chamadas classicamente proibidas.

Contudo, como comentado na aula anterior, a Equação de Schrödinger descreve a energia de uma partícula no tempo e no espaço, e a sua solução é a função de onda associada à esta partícula. Também foi dito que o módulo quadrado da função de onda dá a probabilidade de se encontrar a partícula naquela região do espaço. E foi através dessa previsão matemática que se diagnosticou um estranho fenômeno: a possibilidade de uma partícula passar de uma região classicamente permitida para outra classicamente proibida. Esse fenômeno foi chamado

de *tunelamento quântico* (ou efeito túnel). Assim, dependendo de uma série de fatores (aqui omitidos), a partícula pode atravessar para a região da barreira e ser encontrada nas regiões *II* ou *III*.

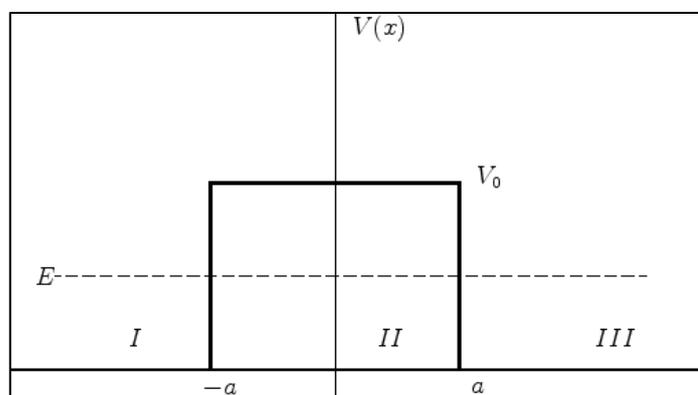


Figura 48: gráfico de uma barreira de potencial⁹⁴.

O entendimento do fenômeno pode ser descrito da seguinte maneira: de acordo com de Broglie, a partícula pode ser entendida como uma onda, e descrita dessa maneira. Assim, movimentando-se como uma onda, ela vai colidir com a barreira de potencial, e nessa colisão existe uma probabilidade de que a onda seja refletida. No entanto, também existe a possibilidade de a onda atravessar a barreira. A compreensão de como esse processo ocorre ainda não é bem conhecido. O que se sabe – e isso pode parecer espantoso – é que, caso a partícula consiga *tunelar* (atravessar a barreira), não há perda de energia nessa ação! É como se a partícula desaparecesse num ponto e reaparecesse em outro! Se a partícula fosse uma pessoa, numa analogia absurda com o mundo macroscópico, essa pessoa poderia atravessar uma parede sem quebrá-la e sem perder sua energia inicial. Felizmente, como discutido no Apêndice 3, as implicações quânticas não se manifestam no mundo macroscópico. A fim de entender o fenômeno do tunelamento, sugere-se a apresentação da Simulação Computacional 8.

Apesar de estranho, o tunelamento quântico está mais presente em nosso cotidiano do que se imagina. Na Física dos semicondutores, o tunelamento é fenômeno no qual a tecnologia se baseia. Os processos de fusão nuclear de algumas estrelas – o nosso Sol entre elas – que não possuem temperatura suficiente para ocorrer de maneira espontânea só são possíveis por causa do tunelamento. O decaimento radioativo, que é a emissão de partículas por núcleos de átomos instáveis, também só é possível quando explicado pelo tunelamento. Entretanto, o fenômeno é o princípio de funcionamento do Microscópio de Varredura por Tunelamento (sigla STM, em

⁹⁴ Fonte: <http://efisica.if.usp.br/moderna/mq/exemplos>.

inglês), aplicação onde se manifesta de modo mais visível. O Vídeo 3 mostra o princípio de funcionamento do STM.

VÍDEO 3

Microscópio de Varredura por Tunelamento (STM)⁹⁵

O vídeo sugerido não possui tradução para o português. No entanto, a simples visualização do fenômeno é bastante clara e objetiva, de modo que o usuário deste produto pode inferir comentários sobre como ocorre o tunelamento durante a exibição do mesmo. A Figura 49 apresenta a estrutura de um *nanotubo de carbono*, uma estrutura cilíndrica formada por uma rede de átomos de carbono com apenas um átomo de espessura, e obtida com o auxílio do STM. A Figura 50 também mostra o quão fina teve ser a ponta do microscópio, a fim de permitir o fluxo de elétrons entre o microscópio e o material analisado. Ambas as imagens foram coloridas artificialmente.

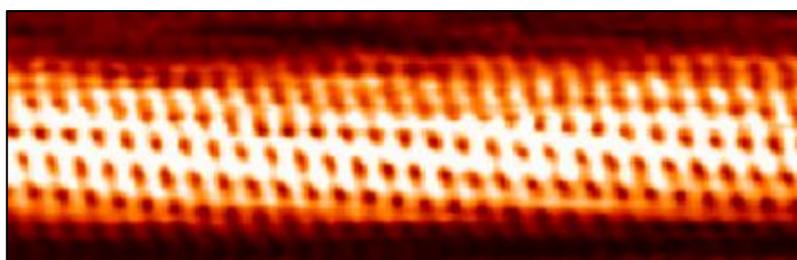


Figura 49: nanotubo de carbono, obtida com o STM⁹⁶.

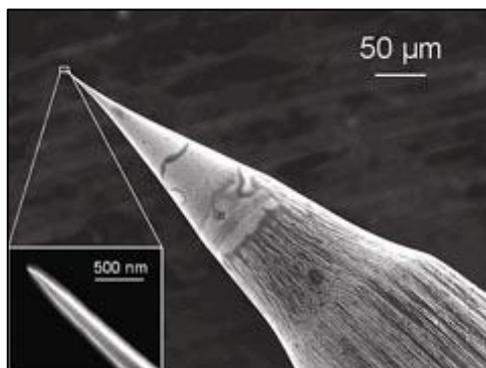


Figura 50: detalhe da ponta de um Microscópio de Varredura por Tunelamento⁹⁷.

⁹⁵ Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=YBOOIWjXOsY>. Acesso em 03/02/17.

⁹⁶ Fonte: http://www.wikiwand.com/en/Scanning_tunneling_microscope.

⁹⁷ Fonte: <https://sites.google.com/site/hatemmaltass/home/scanning-tunneling-microscope-stm>.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 8

Pacotes de onda e tunelamento quântico⁹⁸

- Descrição sumária: a simulação permite um entendimento mínimo do fenômeno do tunelamento quântico, sem que seja preciso recorrer à descrição matemática do fenômeno, através da exibição de um diagrama que descreve a configuração da energia, e de gráficos da função de onda e da probabilidade de uma partícula ultrapassar uma barreira de potencial maior que sua própria energia.

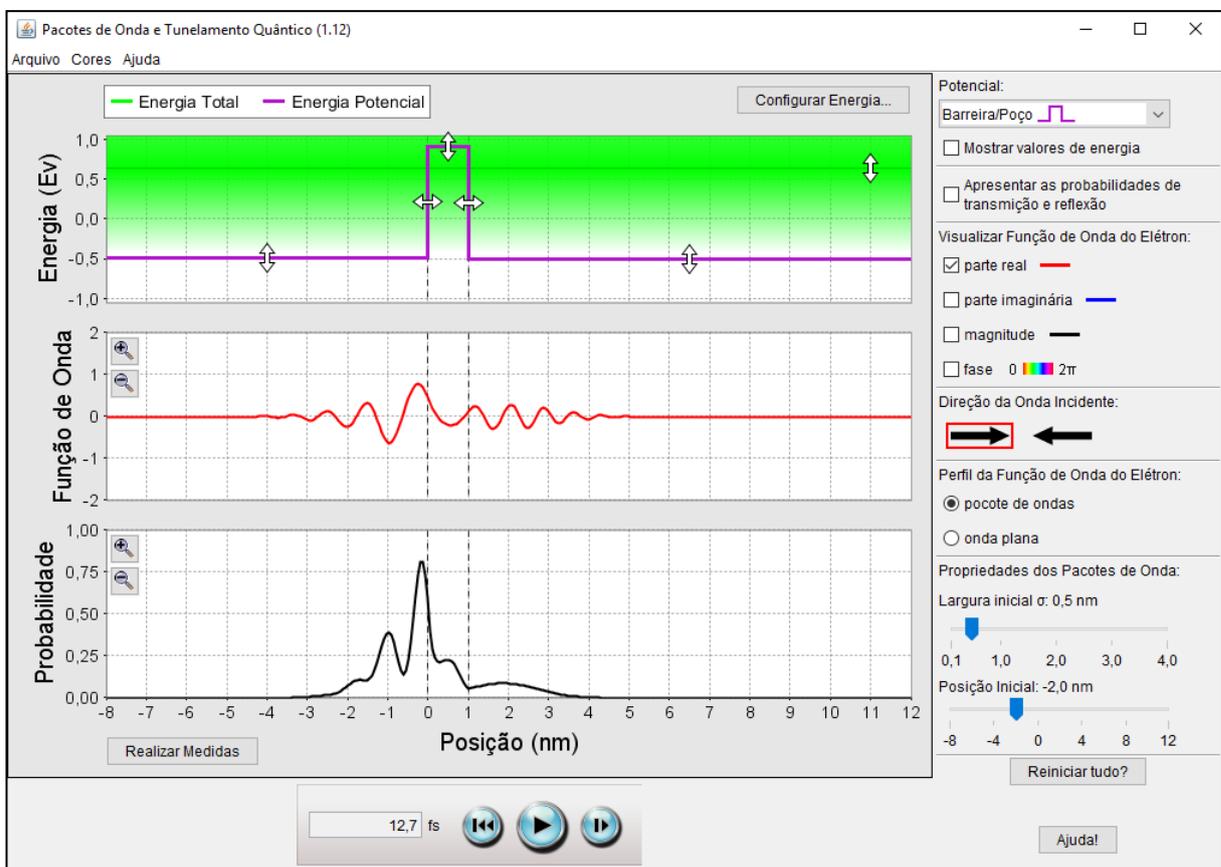


Figura 51: simulação computacional sobre o tunelamento quântico. FONTE: captura de tela.

- Possibilidades educacionais: a simulação é uma eficiente ferramenta de ensino, uma vez que facilita o entendimento do tunelamento sem que se recorra à sua descrição matemática, cujo resultado é uma das soluções possíveis para a Equação de Schrödinger no caso de uma partícula confinada num poço de potencial finito (ou outros obstáculos configuráveis). Essa descrição necessita um alto grau de abstração matemática por parte dos

⁹⁸ Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/hydrogen-atom. Acesso em 03/02/17.

alunos, e que não faria sentido nesta proposta de ensino. A simulação permite várias possibilidades de configuração para a energia da partícula e da barreira de potencial, de forma a contemplar diversas situações. Uma vez configurada a energia no diagrama mais acima, são apresentados, nos gráficos abaixo, os comportamentos da função de onda equivalente, que pode se referir a uma onda plana ou um pacote de ondas, e da probabilidade de tunelamento da partícula naquela situação. Pode-se, ainda, verificar as probabilidades de transmissão e reflexão da onda, a direção de propagação da mesma, e os valores da energia. Além de facilitar o entendimento, a simulação auxilia sobremaneira o professor que não possui grandes habilidades de desenho, sobretudo com relação a projeção de dados em mais de um gráfico, como é esse caso.

- Forma de utilização: a simulação pode ser empregada como forma de auxiliar o entendimento do fenômeno do tunelamento quântico por parte dos alunos, uma vez que o tratamento matemático do mesmo não cabe neste projeto, conforme justificado anteriormente. Nessa perspectiva, a simulação é uma excelente ferramenta de ensino, pois propicia aos estudantes um entendimento conceitual mínimo do fenômeno, que além de inesperado é bastante contra intuitivo. Das diversas configurações possíveis, a barreira de potencial pode ser bem explorada, pois representa o que ocorre com o microscópio de varredura por tunelamento, exemplo citado e explorado para ilustrar o fenômeno.

DESENVOLVIMENTO

Parte 2 – Emaranhamento quântico

O *emaranhamento quântico* (ou entrelaçamento quântico) é outra consequência direta da teoria quântica, carregada fortemente de conceitos abstratos que auxiliam sua descrição. A descrição da teoria será procedida de maneira qualitativa, a fim de destacar suas principais características, sem, no entanto, abranger todo seu formalismo.

Os sistemas físicos, em sua imensa maioria, são formados por conjunto de partículas. Quando duas ou mais partículas são geradas ou interagem entre si, seus estados podem estar ligados de tal forma que não é mais possível descrever apenas uma delas de maneira independente das demais. Assim, os estados observáveis passam a se referir ao sistema como um todo, e não individualmente a cada partícula. Diz-se, então, que estas partículas estão entrelaçadas, ou seja, há uma forte correlação entre elas.

Como forma de ilustrar esse conceito altamente abstrato, será revisitado o experimento mental do gato de Schrödinger. A Equação 25, reproduzida abaixo, traz a função de onda que descrevia aquele sistema físico composto de dois estados, cuja probabilidade de observação de cada estado era a mesma.

$$\Psi_{gato} = \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{vivo} + \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{morto} \quad [25]$$

Como mencionado no encontro anterior, deve-se recordar que dentro da caixa havia, além do gato, uma substância radioativa que poderia decair ou não após um determinado intervalo de tempo. Se houvesse o decaimento, o gato seria encontrado morto, mas se a substância radioativa tivesse se mantido intacta, o bichano continuaria vivo. Ou seja, o estado do gato dependia do estado da substância radioativa, estando esses estados correlacionados. Nesse sistema físico específico, o gato não poderia estar vivo caso a substância radioativa decaísse, e nem morto se não houvesse o decaimento. Assim, pode-se reescrever a Equação 25, condicionando o estado do gato ao estado da substância radioativa:

$$\Psi_{gato} = \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{n\tilde{a}o\ decai}\psi_{vivo} + \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{decai}\psi_{morto}. \quad [26]$$

É bem verdade que, matematicamente, ainda existem outros dois estados possíveis, onde o gato estaria morto caso a substância não decaísse, e vivo, mesmo com o decaimento da substância. Entretanto, neste sistema físico, ambos os estados têm probabilidade zero de serem observados.

A ideia principal do emaranhamento quântico é que, medindo o estado de uma partícula, tem-se de maneira instantânea o estado da outra sem a necessidade de nenhuma outra medição. Sabendo-se apenas se ocorreu ou não o decaimento, não há necessidade de verificar se o gato está vivo ou morto.

Essa estranha constatação foi motivo de intensas discussões filosóficas, particularmente entre Einstein e Bohr. Na verdade, o desenvolvimento conceitual da Mecânica Quântica perturbava Einstein profundamente. Einstein era um determinista convicto, ou seja, ele entendia que tudo na natureza advinha de um processo de causa e efeito, e aparentemente a Mecânica Quântica não obedecia a esses processos. Assim, juntamente com outros dois físicos, o russo *Boris Podolsky* e o norte-americano *Nathan Rosen*, Einstein propôs um experimento mental para criar um paradoxo e contrapor o entendimento que se estava adotando acerca da teoria

quântica. Nesse experimento, que ficou conhecido como *Paradoxo EPR*⁹⁹, os autores imaginaram um sistema constituído por um par de fótons, gerados simultaneamente, e separados por uma distância suficientemente grande, a fim de serem observados individualmente. Sem que nenhuma medição seja feita, o sistema físico em questão encontra-se numa superposição de estados, que têm igual probabilidade de serem observados. Entretanto, se for feita qualquer medição em um dos fótons, a função de onda do sistema irá colapsar e o outro fóton assumirá o estado determinado (pela função de onda) de maneira instantânea. Mas, de acordo com o paradoxo, um fóton não tem como “saber” qual estado foi assumido pelo outro, uma vez que havia igual probabilidade de se observar qualquer dos estados. Assim, essa informação deveria transitar entre os fótons instantaneamente, o que viola um dos postulados da teoria da relatividade restrita de Einstein, onde nenhuma informação pode viajar com velocidade superior à da luz. Ele chegou a chamar tal estranheza de “ação fantasmagórica à distância”. Além disso, com esse experimento mental, Einstein pretendia atacar a teoria quântica que se estabelecia à época, defendida por figuras como Bohr e Heisenberg, com o argumento de que ela feria os princípios da *localidade*¹⁰⁰ e da *causalidade*¹⁰¹, imprescindíveis à compreensão da Física, seja ela Clássica ou Quântica. Em suma, Einstein considerava a teoria quântica incompleta, e se opunha o seu aparente não-determinismo, ao cunhar a famosa frase “Deus não joga dados”. A única saída para o paradoxo, segundo Einstein, seria admitir que a teoria quântica era incompleta, e o resultado das observações dependeria de *variáveis ocultas*¹⁰² predeterminadas.

Bohr, que mantinha intensos debates acerca da teoria quântica com Einstein, e que o convencera anteriormente sobre outros pontos divergentes da teoria, normalmente utilizando argumentos semiclássicos, não obteve sucesso em contrapor o paradoxo EPR. No entanto, em 1964, *John Bell*¹⁰³ publica um teorema em que afirma, dentre outras coisas, que a Mecânica Quântica é uma teoria não-local e não depende de variáveis ocultas. Ele consegue provar que o emaranhamento é possível, e põe por terra o Paradoxo EPR. Assim, provou-se que Einstein

⁹⁹ Paradoxo de Einstein, Podolsky e Rosen.

¹⁰⁰ O princípio da localidade afirma que os processos físicos que ocorrem em um lugar não devem ter efeito imediato sobre os elementos da realidade em outro local, ou seja, medir uma partícula num ponto A não deveria afetar outra partícula num ponto B.

¹⁰¹ O princípio da causalidade diz que um efeito não pode ocorrer a partir de uma causa que não está no passado desse evento.

¹⁰² A teoria das variáveis ocultas entende que o estado de um sistema físico, tal como formulado pela Mecânica Quântica, não dá uma descrição completa do sistema.

¹⁰³ John Stewart Bell (1928-1990), físico norte-irlandês. Desenvolveu o teorema que resolveu o paradoxo EPR, além de prestar importantes contribuições à Teoria Quântica de Campos.

estava equivocado com relação ao emaranhamento quântico. Na verdade, por se basear em pressupostos diferentes daqueles da corrente de pensamento representada por Bohr e Heisenberg, Einstein se mostrou errado em relação a boa parte das discussões da teoria quântica a que tomou partido.

Discutida a teoria, onde se pode verificar suas implicações? Isto é, como o emaranhamento se manifesta no cotidiano? O emaranhamento quântico é a base de diversas tecnologias atuais, e que ainda se encontram em desenvolvimento, como o *computador quântico*. A principal diferença entre um computador quântico e um computador atual é que a informação passa a ser guardada num bit quântico (também chamado qubit) ao invés de um bit clássico. O bit clássico é baseado no sistema binário, podendo assumir os valores 0 e 1. Já um qubit, numa interpretação quântica, pode assumir os estados $|0\rangle$ e $|1\rangle$ ou a superposição de ambos os estados. A Figura 52 faz uma comparação entre um bit tradicional e um qubit.

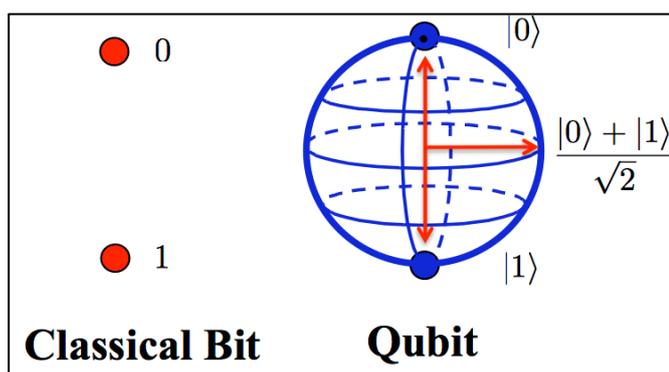


Figura 52: comparação entre um bit clássico e um qubit¹⁰⁴.

Uma vez implementados, os computadores quânticos terão uma capacidade de processamento muito superior quando comparados aos computadores atuais. A Tabela 5 mostra a equivalência entre um bit clássico e um qubit. Para se ter uma ideia, os processadores mais avançados disponíveis no mercado contam com 128 bits. Já a Tabela 6 exemplifica o poder (teórico) de processamento de um computador quântico, numa operação de fatoração de números muito grandes.

Qubit(s)	Bits
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32

¹⁰⁴ Fonte: http://qoqms.phys.strath.ac.uk/research_qc.html.

6	64
7	128
8	256
9	512
10	1.024
20	1.048.576
30	1.073.741.824
40	1.099.511.627.776
n	2 ⁿ

Tabela 5: equivalência entre bits e qubits¹⁰⁵.

Comprimento do número a ser fatorado (em bits)	Tempo de fatoração por um algoritmo clássico	Tempo de fatoração por um algoritmo quântico (Shor)
512	4 dias	34 segundos
1024	100 mil anos	4,5 minutos
2048	100.000 bilhões de anos	36 minutos
4096	100 bilhões de quatrilhões de anos	4,8 horas

Tabela 6: comparação entre os tempos de fatoração de algoritmos clássicos e quânticos¹⁰⁶.

Além da computação quântica, o conceito de emaranhamento também pode ser encontrado em outras áreas de estudo, como a *criptografia quântica*, que será a base de segurança para os computadores quânticos, e até mesmo o *teletransporte quântico*, onde a informação (e não a matéria) é transmitida por meios quânticos.

DESENVOLVIMENTO

Parte 3 – Supercondutividade

A supercondutividade é um fenômeno físico que ocorre em alguns materiais, quando resfriados a baixas temperaturas, cujo resultado é a condução elétrica praticamente sem resistência ou perdas significativas de energia. O tema foi escolhido de maneira proposital porque pode ser compreendido como um fenômeno quântico que se manifesta em corpos macroscópicos. Entretanto, tendo em vista a complexidade do assunto, não serão procedidas análises quanto ao comportamento quântico do fenômeno.

¹⁰⁵ Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Bit_qu%C3%A2ntico.

¹⁰⁶ Fonte: https://www.gta.ufrj.br/grad/11_1/quantica/trabalho002.html.

Descoberto em 1911 por *Heike Onnes*¹⁰⁷, durante suas pesquisas com o resfriamento de materiais a temperaturas próximas do zero absoluto, a supercondutividade pode ser entendida, sob o ponto de vista da Física Clássica, como a idealização de um condutor perfeito. Com a diminuição gradual da temperatura, um condutor tende a ter sua resistividade diminuída. Entretanto, alguns materiais como o mercúrio, chumbo e estanho, quando atingem uma determinada temperatura crítica (característica de cada material), ingressam na chamada fase supercondutora, onde o fenômeno se manifesta.

Os estudos na área foram aprofundados e diversificados. Em 1933 foi descoberta uma outra faceta da supercondutividade: a levitação magnética. Na fase de supercondutor, quando a temperatura crítica é atingida, os materiais não permitem que campos magnéticos adentrem seu interior. Com isso, a corrente que flui pelo material gera um campo magnético dentro do condutor que contrapõe o campo que deveria penetrá-lo, deixando o corpo em suspensão. Esse comportamento ficou conhecido como *efeito Meissner*. A Figura 53 ilustra o que ocorre no efeito Meissner.

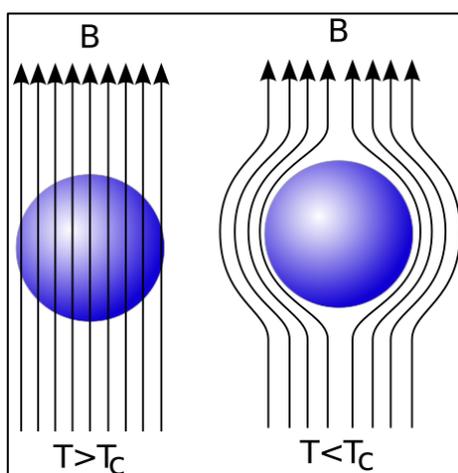


Figura 53: representação do efeito Meissner¹⁰⁸.

Em 1957 foi proposta uma teoria que começou a explicar o fenômeno da supercondutividade. A *teoria BCS*¹⁰⁹ foi pautada na Mecânica Quântica, e diz que elétrons de um supercondutor tendem a se condensar e formar os chamados pares de Cooper. Esses pares

¹⁰⁷ Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926), físico holandês. Conduziu diversos estudos sobre o comportamento de materiais a baixíssimas temperaturas, vindo a descobrir a supercondutividade. Foi premiado com o Nobel de Física em 1913.

¹⁰⁸ Fonte: http://www.wikiwand.com/pt/Efeito_Meissner.

¹⁰⁹ Batizada em homenagem aos físicos norte-americanos John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer, ganhadores do Nobel de Física de 1972 por este trabalho.

e adoção de tecnologias baseadas no fenômeno. A Figura 54 mostra a distribuição cronológica da descoberta de materiais com características supercondutoras, com base na temperatura crítica de cada material, onde se percebe um grande desenvolvimento da tecnologia a partir da metade da década de 1980.

A pesquisa com supercondutores certamente é, dentro da Física, um dos ramos mais profícuos. Com o desenvolvimento dos supercondutores de alta temperatura crítica, cada vez mais existirão tecnologias baseadas na teoria. Os eletroímãs mais poderosos que existem utilizam-se de supercondutores. Esses magnetos são encontrados em aparelhos de ressonância magnética, espectrômetros de massa e aceleradores de partículas. Também são largamente empregados na medicina nuclear em geral e como suporte a aparatos de pesquisa.

Todavia, as tecnologias pautadas na levitação magnética talvez sejam as que irão causar maior impacto na vida das pessoas. Pensados como solução à crescente demanda por transporte, os trens de levitação magnética (também chamados Maglevs) podem resolver boa parte do problema de mobilidade nas grandes cidades, com a vantagem de não emitirem poluentes advindos da queima de combustíveis fósseis. O Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), desenvolve uma versão de um trem de levitação magnética com as características supracitadas. A levitação magnética é baseada no efeito Meissner, discutido nesta seção. A Figura 55 mostra a ocorrência do fenômeno, utilizando um material supercondutor resfriado por nitrogênio líquido, sobre o qual flutua um ímã. No Maglev, o conceito utilizado é o mesmo, com a diferença de que é o trem que, dotado de um material supercondutor em sua porção inferior (e resfriado por alguma substância refrigerante), flutua sobre uma malha que produz um campo magnético.

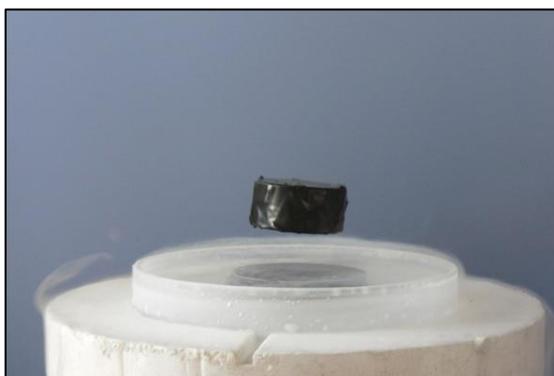


Figura 55: levitação magnética de um ímã sobre um supercondutor¹¹².

¹¹² Fonte: <https://www.scientificamerican.com/article/how-do-they-do-that-a-closer-look-at-quantum-magnetic-levitation>.

Convém ressaltar que outros trens de alta velocidade, de países da Europa e Ásia, são em sua grande maioria transportes que não se utilizam da tecnologia proporcionada pela supercondutividade, mas sim através de campos eletromagnéticos, gerados por eletroímãs. O trem flutua devido à repulsão gerada por campos eletromagnéticos, fenômeno explicado pelo eletromagnetismo clássico.

VÍDEO 4

Trem Maglev Cobra¹¹³

O vídeo sugerido foi produzido pela COPPE/UFRJ, e explica de modo sumário o projeto do Maglev Cobra, inclusive com seu princípio de funcionamento a partir da levitação magnética.

CONCLUSÃO

O mau uso da teoria quântica

Pode-se perceber, ao longo deste encontro, que a Mecânica Quântica está mais presente no cotidiano do que se imagina. As tecnologias por ela possibilitadas facilitam, geram conforto e prolongam a vida de grande parte da população, e as perspectivas para um futuro próximo são extremamente positivas.

Além disso, todo material, equipamento ou dispositivo dito “eletrônico” envolve, em algum nível, a manipulação de elétrons em um circuito. Assim, qualquer aparelho que contenha um circuito (ou placa) eletrônico é baseado na Mecânica Quântica.

No entanto, como comentado no Terceiro Encontro, não são todos os corpos que manifestam as propriedades quânticas. Na verdade, existe um limite bem estabelecido: moléculas. Se uma bola de futebol não pode difratar, então nenhum outro corpo macroscópico pode. A baixíssimas temperaturas, um conjunto de átomos ou moléculas atinge seu nível de energia mais baixo, e as propriedades quânticas podem se manifestar em escala macroscópica, o que não é o caso de nenhum dos exemplos citados a seguir. Apesar disso, um número cada

¹¹³ Disponível em <https://www.youtube.com/embed/MnR7iTjmSPg>. Acesso em 03/02/17.

vez maior de tentativas de aplicação de conceitos quânticos a corpos macroscópicos é registrado. Também se avolumam as publicações (não científicas) nesse sentido.

Algumas pessoas se utilizam da Mecânica Quântica para criar projetos de *moto perpétuos*¹¹⁴, cuja possibilidade funcionamento já foi refutada pela Mecânica Clássica há séculos, uma vez que o princípio da conservação da energia é válido para qualquer ramo da Física. Com a promessa de extrair energia quase infinita de estados de energia mais baixos que o ponto zero, a partir de moléculas de água, ou então do vácuo, vários *sites* têm se propagado nos últimos anos, inclusive com a disponibilização dos supostos projetos. A Figura 56 foi retirada de um desses canais da *internet*, e traz a propaganda enganosa sobre um “gerador quântico de energia elétrica”.



Figura 56: anúncio de um “gerador quântico de energia elétrica”¹¹⁵.

De um outro modo, algumas publicações utilizam a Mecânica Quântica como fonte de uma medicina alternativa. A teoria quântica tem contribuído de maneira grandiosa com o desenvolvimento de aparatos tecnológicos de investigação e diagnóstico, inicialmente com os raios X, e mais recentemente com aparelhos de ressonância magnética e tomógrafos. Mas os conceitos quânticos não podem e não devem ser aplicados às pessoas pelos mesmos motivos discutidos no Terceiro Encontro. Uma dessas fantasias – a “cura quântica” – parte da ideia de que se a pessoa realizar medições quânticas contínuas de um estado de “boa saúde” em si jamais vai adoecer. Pode-se até discutir a influência da fé e do pensamento positivo na saúde e bem-

¹¹⁴ Moto perpétuos ou moto contínuos são máquinas hipotéticas cuja função é gerar mais energia do que consomem.

¹¹⁵ Fonte: <http://www.anovaordemmundial.com/2014/04/gerador-quantico-de-energia-eletrica-manual-para-criar-gerador-de-energia-livre.html>. Acesso em 03/02/17.

estar das pessoas, mas quanto à influência dos conceitos quânticos não cabe qualquer discussão. A Figura 57 traz um exemplo de publicação dessa linha de pensamento.

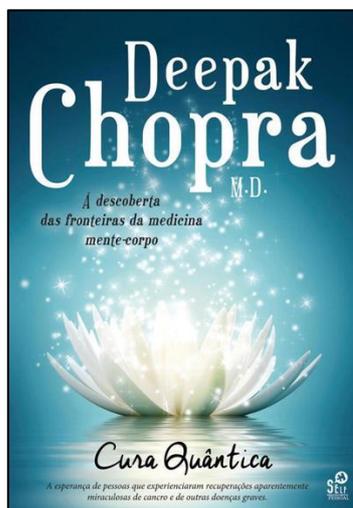


Figura 57: exemplo de publicação sobre a chamada “cura quântica”¹¹⁶.

E porque tais ideias não devem ser levadas em consideração? Simplesmente porque não encontram nenhuma base na teoria quântica, tampouco são encontradas em publicações respeitáveis e cientificamente reconhecidas! Não se deve confundir ciência com meta-ciência.

¹¹⁶ Fonte: <http://www.fnac.pt/Cura-Quantica-Deepak-Chopra/a948163>.

APÊNDICES

Apêndice A – Guia da Aula 1

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

GUIA AULA 1

Discussões a respeito da natureza da luz

Teoria corpuscular:

Defensores: _____

Argumentos: _____

Teoria ondulatória:

Defensores: _____

Argumentos: _____

Corpo Negro

Definição: _____

Exemplos de corpos negros

Corpo	Temperatura (K)	Comprimento de onda (nm)	Faixa do espectro EM (pico)
Terra	300		
Forno	660		
Filamento lâmpada	3000		
Sol	5700		
Lava			
Gigante Vermelha			
Gigante Azul			
Anã Branca			
Anã Marrom			
N (líquido)			
He (líquido)			
He (sólido)			

Emissão e absorção de radiação pelos átomos

Explicação: _____

Links dos simuladores

Corpo negro https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/blackbody-spectrum

Emissão / Absorção https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/discharge-lamps

Apêndice B – Guia da Aula 2

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

GUIA AULA 2**Discussões a respeito da natureza da luz****Ondas:**

Definição e características: _____

Propriedades:

Reflexão: _____

Refração: _____

Difração: _____

Interferência: _____

Polarização: _____

O experimento de dupla-fenda de Young

Explicação: _____

Efeito Fotoelétrico

Problemas da explicação da Física Clássica: _____

Explicação da proposta por Einstein: _____

Elemento	Função trabalho (ϕ) (eV)	Frequência de corte (f_0) (Hz)	Comprimento de onda (nm)	Faixa do espectro EM
Sódio	2,28			
Zinco	4,3			
Cobre	4,7			
Platina	6,35			
Cálcio	2,9			
Magnésio	3,68			

Valores de constantes

Velocidade da luz no vácuo: $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$

Constante de Planck: $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$ ou $h = 4,135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$

Conversão Joule elétron-volt: $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

Produto $hc = 1240 \text{ eV nm}$

Links dos simuladores

Interferência de ondas https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-interference

Efeito fotoelétrico https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric

Apêndice C – Guia da Aula 3

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

GUIA AULA 3**Dualidade onda-partícula**

Conceito: _____

Efeito Compton

Conceito: _____

Equação: $p =$

Implicações: _____

Ondas de matéria

Conceito: _____

Equação: $\lambda =$

Implicações: _____

Experimento de dupla fenda

Fótons: _____

Partículas: _____

O princípio da incerteza

Conceito: _____

Interpretação matemática: _____

Implicações: _____

Links dos simuladores

Exp. Davisson-Germer https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/davisson-germer

Interferência quântica https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference

Modelos átomo H https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/hydrogen-atom

Apêndice D – Guia da Aula 4

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

GUIA AULA 4**Função de onda**

Conceito: _____

Estado

Conceito: _____

Probabilidade

Conceito: _____

Medição

Conceito: _____

O gato de Schrödinger

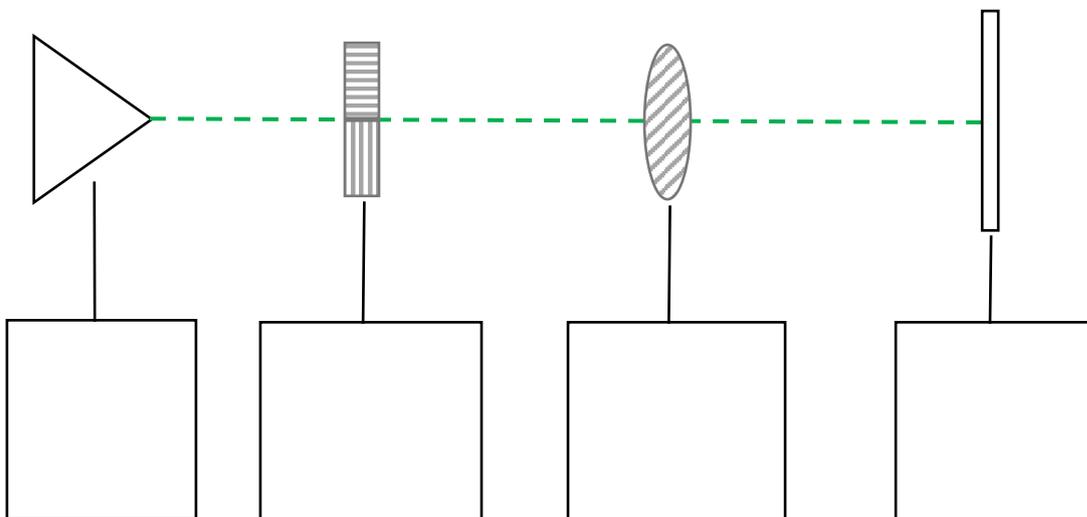
Conceito: _____

Experimento de dupla fenda com partículas

Conceito: _____

Experimento da borracha quântica

Identifique cada um dos componentes do experimento, e descreva sua função



Links dos simuladores

Interferência quântica

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference

Tunelamento quântico

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-tunneling

Apêndice E – Teste Inicial

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

NOME: _____ Nº: _____ TURMA: _____

O PRESENTE TESTE TEM POR FINALIDADE REUNIR SUBSÍDIOS PARA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO QUAL ESTA OFICINA FAZ PARTE. ASSIM, SOLICITA-SE AO ALUNO QUE RESPONDA APENAS AQUILO QUE SEJA DO SEU CONHECIMENTO, E USE DA MAIOR SINCERIDADE POSSÍVEL NAS RESPOSTAS DISCURSIVAS.

1. Abaixo estão listados alguns termos da física que você já conhece, ou ouviu falar, em algum momento de sua vida. Assinale, nos parênteses, a letra “P” se você considera que o termo possui características de partícula, ou “O” se o termo apresenta alguma propriedade relacionada às ondas:

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> frequência | <input type="checkbox"/> ponto material |
| <input type="checkbox"/> efeito fotoelétrico | <input type="checkbox"/> interferência |
| <input type="checkbox"/> difração | <input type="checkbox"/> polarização |
| <input type="checkbox"/> colisão elástica | <input type="checkbox"/> energia cinética |
| <input type="checkbox"/> espectro eletromagnético | <input type="checkbox"/> experimento da dupla-fenda |
| <input type="checkbox"/> elétron | <input type="checkbox"/> fóton |

2. A fim de angariar fundos para obras sociais, um professor organizou uma rifa beneficente entre os alunos de uma turma. O aluno A adquiriu $2/13$ dos bilhetes; o aluno B, $1/7$; o aluno C, $3/25$; o aluno D, $5/33$; e o aluno E, $7/45$. Qual aluno tem mais chance de ganhar o prêmio?

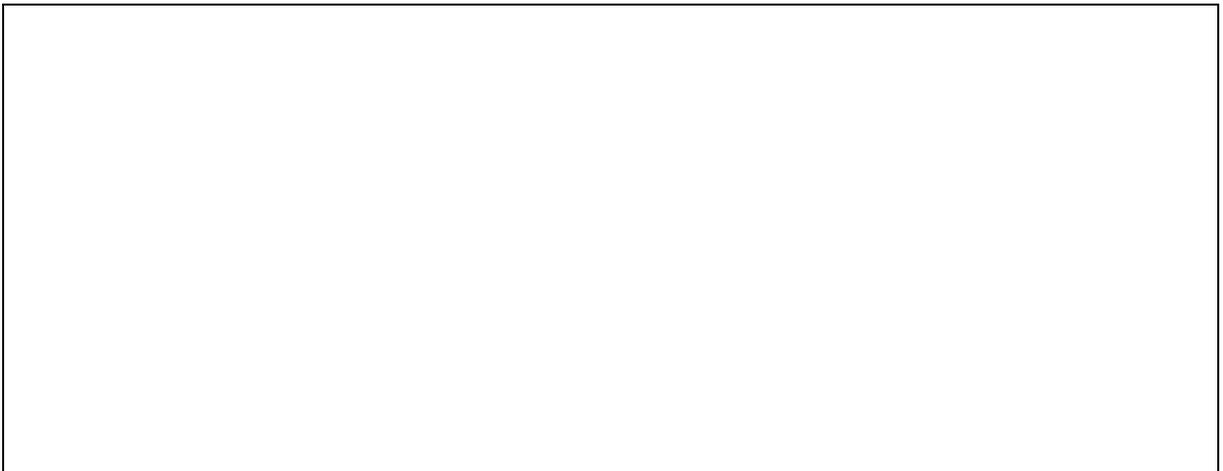
- | | | |
|-------|-------|-------|
| (a) A | (b) B | (c) C |
| (d) D | (e) E | |

3. Explique, de forma sucinta, qual método de estudo você adota para se preparar para as avaliações de física. Você estuda diariamente? Ou se concentra apenas antes da prova?

4. Suponha que você esteja fazendo uma avaliação teórica de física. Uma das questões da avaliação você nunca tinha resolvido em sala com seu professor, e você somente pode recorrer aos seus pensamentos. Marque a opção que ilustra sua provável atitude diante da resposta a essa questão:

- (a) deixaria a questão em branco, por que, tenho dificuldade em física;
- (b) escreveria algumas frases tentando acertar no chute;
- (c) escreveria sobre o primeiro raciocínio que tive, sem pensar muito;
- (d) tentaria escrever uma resposta coerente com algum fenômeno ou situação que já vivenciei;
- (e) buscaria responder usando as questões que já estudei em sala de aula, da mesma forma que o professor passou no quadro.

5. Desenhe, no quadro abaixo, como você imagina ser o átomo, representando suas partes e/ou constituintes.



6. Represente, no quadro abaixo, os conceitos da Mecânica Quântica que você conhece e, se possível, estabeleça alguma relação gráfica entre eles.



Apêndice F – Teste Final

OFICINA SOBRE PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

TESTE FINAL

NOME: _____ Nº: _____ TURMA: _____

1. No final do século XIX, a teoria mais aceita a respeito da natureza da luz era a _____, que desde meados do século XVIII havia superada a teoria _____, proposta por *Isaac Newton*.

- (a) corpuscular / ondulatória (d) clássica / corpuscular
 (b) ondulatória / relatividade (e) corpuscular / moderna
 (c) ondulatória / corpuscular

2. Quais foram os dois problemas da física resolvidos, no início do século XX, que serviram para o novo entendimento da natureza da luz, e como estopim para o desenvolvimento da Mecânica Quântica? (escolha duas alternativas)

- () tunelamento () o gato de Schrödinger
 () efeito fotoelétrico () princípio da incerteza
 () dualidade onda-partícula () radiação do corpo negro

3. Baseado na dualidade onda-partícula, *Louis de Broglie* propôs, em 1923, na sua tese de doutorado, que deveria haver simetria entre a luz e a matéria, na teoria que ficou conhecida como ondas de matéria. Das alternativas abaixo, qual melhor explica a proposição de *de Broglie*?

- (a) Se os fótons são onda, então a matéria pode ser composta de partículas
 (b) O comprimento de onda de um elétron é diretamente proporcional à sua energia
 (c) Ficou comprovado que a constante de Planck, por ter um valor muito próximo de zero, não deveria ser considerada nas equações da Mecânica Quântica
 (d) Se a luz possui momentum linear, então a matéria pode apresentar características de onda
 (e) Einstein e Planck estavam errados nas concepções do efeito fotoelétrico e da quantização da energia

4. Explique, de forma sucinta, o que diz o Princípio da Incerteza, proposto por *Werner Heisenberg* em 1927.

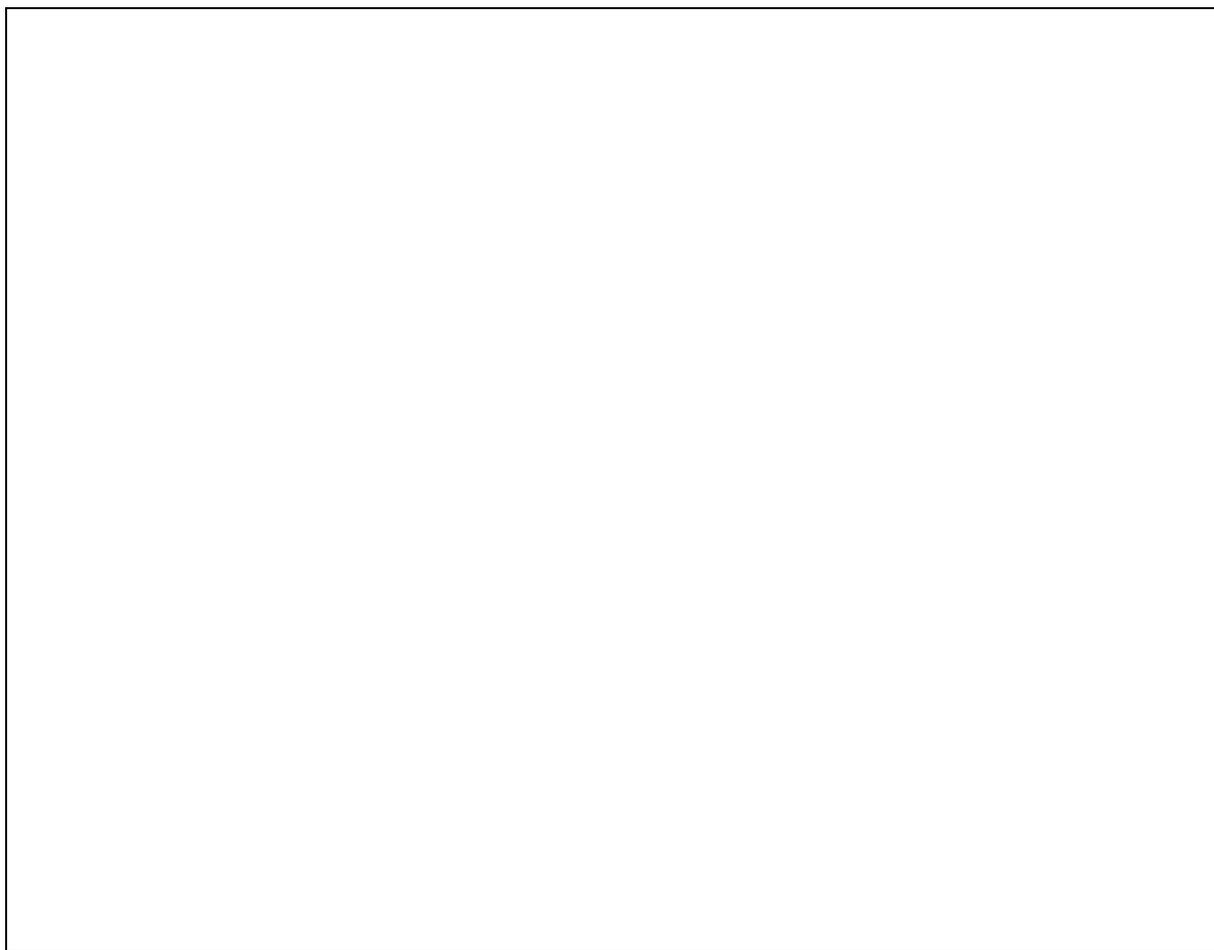
5. A grande vantagem do experimento denominado borracha quântica é que, através dele, podemos constatar boa parte dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica. Abaixo temos, na coluna da esquerda, a relação de alguns desses princípios, e na coluna da direita, a explicação dos mesmos. Relacione, de maneira correta, as duas colunas.

- | | |
|-------------------------------|--|
| (a) função de onda | () interpretação matemática do módulo quadrado da função de onda |
| (b) medição | () coexistência de vários estados possíveis ao mesmo tempo |
| (c) superposição de estados | () equação que descreve o comportamento no tempo e no espaço de uma partícula |
| (d) probabilidade | () resulta da tentativa de medir alguma característica da partícula |
| (e) colapso da função de onda | () ato que acaba por alterar o sistema físico |

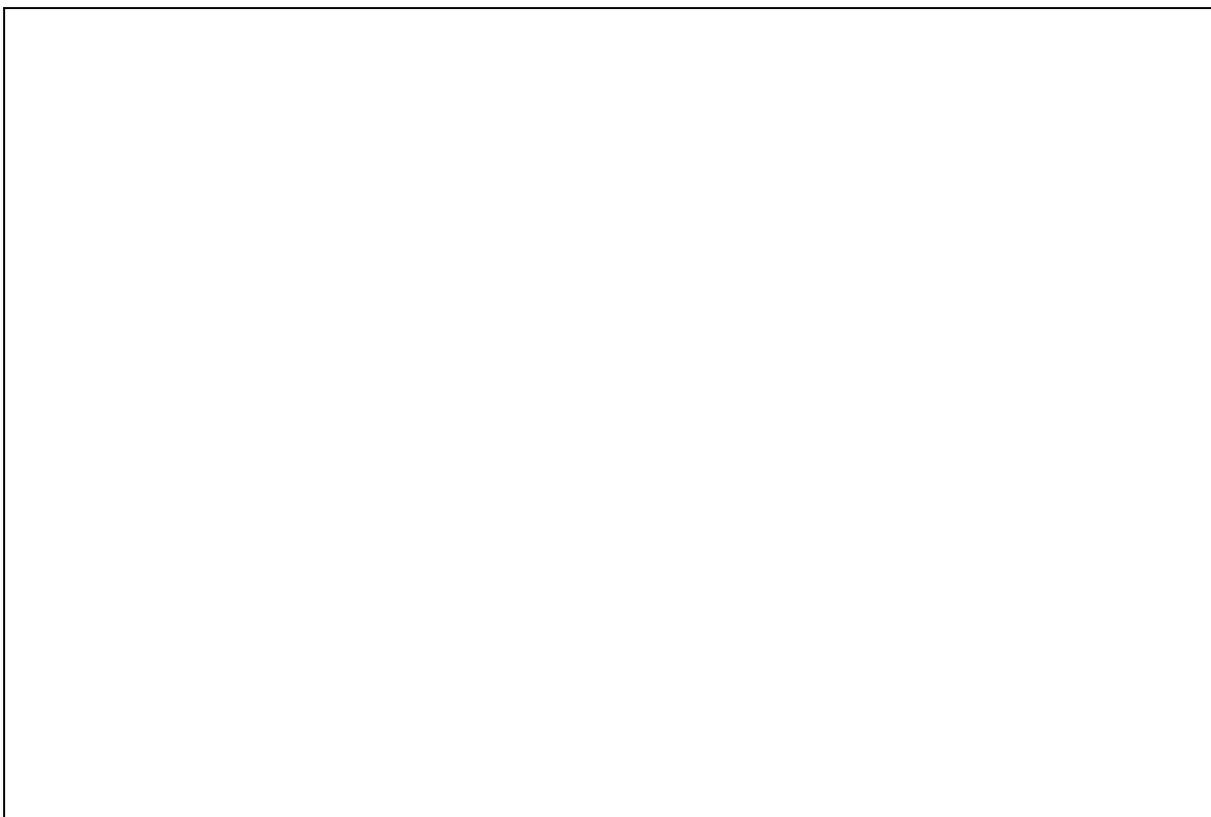
6. O experimento mental denominado “gato de Schrödinger” foi proposto em 1935 por *Erwin Schrödinger*, um dos responsáveis pelo desenvolvimento da Mecânica Quântica, na tentativa de demonstrar o quão estranha era a interpretação da mesma pela vertente denominada “Escola de Copenhague”. Uma das constatações mais intrigantes do experimento era de que o famigerado gato poderia estar, ao mesmo, vivo e morto. Como você explicaria tal fato a outro colega que não participou de nossa oficina?

7. Dos conceitos apresentados na oficina, qual(is), causou(aram) maior surpresa para você? Explique o motivo.

8. Baseado nos conhecimentos compartilhados na oficina, desenhe, no quadro abaixo, como você imagina ser o átomo, representando suas partes e/ou constituintes, e identificando-os.



9. Represente, no quadro abaixo, os conceitos da Mecânica Quântica que apresentaram maior significado para você e, se possível, estabeleça alguma relação gráfica entre eles.



10. Você acha que, de alguma forma, essa oficina foi útil na sua formação no Ensino Médio? Justifique sua resposta, e atribua um valor de um a dez para a importância de nosso estudo.

**SUA CONTRIBUIÇÃO FOI EXTREMAMENTE VALOROSA PARA A EXECUÇÃO
DESTE PROJETO. OBRIGADO E MUITO BOA SORTE NO PROSSEGUIMENTO DE
SEUS ESTUDOS!**

REFERÊNCIAS

AUSUBEL, D. P. *Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva*. 1. ed. Lisboa: Paralelo Editora, 2003.

BASSALO, J. M. F. A crônica da ótica clássica (parte I). *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 3, n. 3, p. 138-159, dez. 1986.

BASSALO, J. M. F. A crônica da ótica clássica (parte II). *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 4, n. 3, p. 140-150, dez. 1987.

BASSALO, J. M. F. A crônica da ótica clássica (parte III). *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 37-58, abr. 1989.

BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de física moderna? *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 387-404, dez. 2005.

CARDOSO, S. O. O.; DICKMAN, A. G. Simulação computacional aliada à Teoria da Aprendizagem Significativa: uma ferramenta para o ensino a aprendizagem do efeito fotoelétrico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 29, n. Especial 2, p. 891-934, out. 2012.

CARUSO, F.; OGURI, V. *Física Moderna – Origens clássicas e fundamentos quânticos*. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHEVALLARD, Y. *La transposición didáctica: del saber sabio al saber enseñado*. La Pensée Sauvage, Argentina, 1991.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 444-457, dez. 2001.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. 8ª ed., v.4. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HILLMER, R.; KWIAT, P. A do-it-yourself quantum eraser. *Scientific American*, New York, v. 296, n. 5, p. 72-77, May 2007.

JUNIOR, J. H. F.; LUNAZZI, J. J. *Construção de uma borracha quântica*. Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2007/JorgeH-MonicaRF.pdf>. Acesso em: 15 junho 2015.

LEITE, A.; SIMON, S. Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da teoria quântica. *Sci. stud.*, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 213-

241, jun. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-31662010000200004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 maio 2017.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. *Física contexto e aplicações*. 1ª ed., v.2. São Paulo: Scipione, 2013.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no Ensino da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 77-86, jun. 2002.

MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. 2ª ed. São Paulo: EPU, 2014.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Relatividade restrita no Ensino Médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, n. 1, p. 83-102, abr. 2004.

PEREIRA, A. P.; PESSOA JR., O.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 29, n. Especial 2, p. 831-863, out. 2012.

SAKURAI, J. J.; NAPOLITANO, J. *Mecânica Quântica moderna*. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SILVA, I.; JUNIOR, O. F. A descoberta do efeito Compton: de uma abordagem semiclássica a uma abordagem quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 1601, fev. 2014.

SOARES, A. A.; MORAES, L. E.; OLIVEIRA, F. G. Ensino de matéria e radiação no ensino médio com o auxílio de simuladores interativos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 32, n. 3, p. 915-933, dez. 2015.

SOUZA, V. C. A.; JUSTI, R. S.; FERREIRA, P. V. M. Analogias utilizadas no ensino dos modelos atômicos de Thomson e Bohr: uma análise crítica sobre o que os alunos pensam a partir delas. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 7-28, mar. 2006.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola de 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

TERRAZZAN, E. A. *Perspectivas para a inserção de física moderna na escola média*. São Paulo: Curso de Pós-Graduação em Educação - USP, 1994. Tese.

TOWNSEND, J. S. *Quantum Physics – A fundamental approach to modern physics*. 1ª ed. Sausalito: University Science Books, 2010.

ZAMBON, L. B.; TERRAZAN E. A. Analogias produzidas por alunos do ensino médio em aulas de física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 1505, mar. 2013.